



UNIVERSIDAD DE BELGRANO

Las tesinas de Belgrano

**Facultad de Ingeniería y Tecnología Informática
Ingeniería Industrial**

**Investigación y construcción de un piloto
analizador de ambiente para calefón**

Nº 56

Walter Del Re

Tutor: Mario D. Paolucci

**Departamento de Investigación
Mayo 2003**

Un agradecimiento muy especial al Ing. Mario Dante
Paolucci quien ha sido el tutor del presente trabajo
y al Ing. Pedro Martos del Instituto del gas
Argentino por su grata colaboración

Índice

Índice	5
Introducción	7
Capítulo 1: El calefón de estos tiempos	8
1.1 El calefón y sus elementos constitutivos	8
Capítulo 2: Introducción a la combustión en pilotos normales	18
2.1 Introducción a la combustión y estequiometría de las reacciones	18
2.2 Combustión del metano	24
2.3 Estabilidad de llama en la combustión	29
Capítulo 3: Tecnología de la combustión y desarrollo del piloto analizador	36
3.1 Comportamiento de un quemador según su geometría	36
3.2 Construcción de un piloto analizador de ambiente	40
Capítulo 4: Análisis del mercado y de los contaminantes	42
4.1 Análisis del mercado.	42
4.2 Efecto de los gases de combustión sobre la salud.	45
4.3 Consecuencias ambientales por los gases de combustión	48
Conclusión	54
Bibliografía	55

Introducción

Todos los años con la llegada del frío, dado al incremento en el uso de artefactos alimentados a gas, y fundamentalmente debido a la escasa ventilación con que cuentan las viviendas en esos días, se produce un marcado ascenso de accidentes –muchas veces fatales- por inhalación de monóxido de carbono o por asfixia.

Esto se debe a la combustión incompleta del gas natural que conduce a la formación de gases tóxicos, tales como monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x), generalmente letales para el ser humano. Además pueden quedar hidrocarburos sin reaccionar, siendo el CH₄ bastante nocivo para el medio ambiente dado que posee una capacidad 21 veces superior que el CO₂ para producir el efecto invernadero con las consecuencias ya conocidas.

El monóxido de carbono, originado por esta combustión incompleta, se combina con la sangre a través de los pulmones mucho más fácilmente que el propio oxígeno.

De acuerdo con el tiempo de exposición puede provocar desde dolores de cabeza, desmayos y hasta la muerte. Aún con poca cantidad de partículas y una exposición relativamente breve produce daños irreparables.

La larga exposición a la llama a la que están expuestas las personas que se encuentran todo el día en ambientes cerrados, suele provocar una intoxicación progresiva – no detectable día a día – que va alterando el funcionamiento del sistema nervioso y provoca cambios de humor y lesiones neurológicas.

Desde la época de “Gas del Estado” los artefactos tenían como única exigencia el uso de una válvula de seguridad, llamada termocupla, que cortara el paso del combustible si la llama del quemador principal era apagada accidentalmente.

Dado que este sistema no contempla los accidentes por inhalación del monóxido de carbono, a fin de los 90 tras un análisis de las medidas de seguridad de la Comunidad Europea, se decidió introducir en Argentina el piloto analizador de atmósfera cumpliendo con el objetivo de cortar el paso del gas cuando el nivel de oxígeno en el ambiente es bajo.

Para alcanzar este objetivo, la resolución Nro 1188 del Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS) establece que todos los fabricantes de artefactos a gas a partir del 1º de marzo del 2000 deberán producir y comercializar estos artefactos con un dispositivo control de atmósfera. Dado a la falta de documentos normativos y técnicos por parte del ENARGAS, se vieron obligados a prorrogar la fecha límite para su aplicación al 1º de julio del 2002.

Esta tesina tiene por objeto investigar el marco teórico que acontece al proceso de combustión y delinear el principio de funcionamiento de los pilotos “analizador de ambiente”. Asimismo tratará de dar los parámetros geométricos y la construcción de un prototipo para la comprobación de la fase teórica.

Para la investigación y desarrollo de la tesina, se han consultado diversas fuentes de información, tales como: revistas del rubro energético, normativas y resoluciones de entes reguladores (ENARGAS, CAFA-GAS, IGA), se han realizado consultas y entrevistas a centros de investigación (INTI) y a empresas relacionada con la actividad (Orbis S.A., Eskabe S.A., Del Re Hnos. S.R.L., Tonka S.A., etc).

Se ha entrevistado en varias ocasiones al presidente del IGA (Instituto del Gas Argentino), el señor Ing. Pedro Martos.

Se realizaron ensayos utilizando el laboratorio de la firma Del Re Hnos. S.R.L para determinar los parámetros geométricos de los nuevos pilotos, también se utilizaron sus máquinas – herramienta y sus materiales para la construcción del piloto analizador prototipo.

El presente trabajo ha sido ordenado separado en cuatro partes:

- **Primera:** Descripción del calefón moderno
- **Segunda:** introducción a la combustión, estequiometría de las reacciones, reacciones químicas y cinética de las reacciones, estabilidad de llama en la combustión, e incluye un análisis de la combustión de tres modelos distintos de pilotos comercializados actualmente.
- **Tercera:** Tecnología de la combustión y desarrollo de un piloto analizador, incluye ensayos realizados por una Universidad Colombiana y ensayos realizados exclusivamente para el desarrollo de la tesina.
- **Cuarta:** Aspectos del mercado, daños de los contaminantes al ser humano y al medio ambiente.

1. El calefón de estos tiempos

1.1 El calefón y sus elementos constitutivos.

El agua caliente hoy en día es un elemento de confort imprescindible en una vivienda e indispensable para el ser humano. En la actualidad existen diferentes tecnologías para producirla, una de ellas es el calentador eléctrico que por medio de una resistencia y el paso de una corriente eléctrica disipa calor, el cual es absorbido por el agua acumulada en un recipiente, elevando su temperatura.

Otra tecnología y la más utilizada en la Argentina es la combustión de un hidrocarburo, de los cuales los más usuales son el gas licuado o envasado constituido principalmente por propano C_3H_8 o butano C_4H_{10} y el gas natural constituido principalmente por metano CH_4 .

Dentro de esta segunda tecnología existen en el mercado tres grupos de aparatos destinados a tal fin:

- ◆ Calentadores acumuladores (Calderas y termotanques).
- ◆ Caldera de doble servicio (calefacción y agua caliente).
- ◆ Calentadores instantáneos (Calefones).

La característica principal de los calefones es calentar el agua a medida que ésta es consumida. Al abrir el grifo correspondiente se establece una circulación de agua, la cual al detectarse, enciende el quemador principal aportando su calor al liquido circulante por la serpentina produciendo un aumento de su temperatura.

El anexo A describe las ventajas y desventajas del calefón frente al termotanque.

A este artefacto se lo define por su capacidad en litros, que se refiere al calentamiento del agua en litros por minuto, para provocar un aumento de su temperatura en $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. En plaza existen de 8, 12, 14, 18 y 20 litros; Por ejemplo al tomar el de 14 litros significa que cuando circule un caudal de 14 l/min. la diferencia de temperatura del agua entrante y saliente será de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Elementos constitutivos

El calefón es un artefacto constituido básicamente por los siguientes elementos, tal como se puede visualizar en la figura 1.1.1:

- ◆ El intercambiador de calor compuesto por un serpentín, por el cual circula el agua a calentar. (1)
- ◆ Sombrero superior. (2)
- ◆ Tubo venturi y cámara de agua. (3)
- ◆ Válvula agua – gas (*con llama piloto y sin llama piloto*). (4)
- ◆ Sistema de seguridad. (5)
- ◆ El piloto. (6)
- ◆ El quemador principal o mechero. (7)

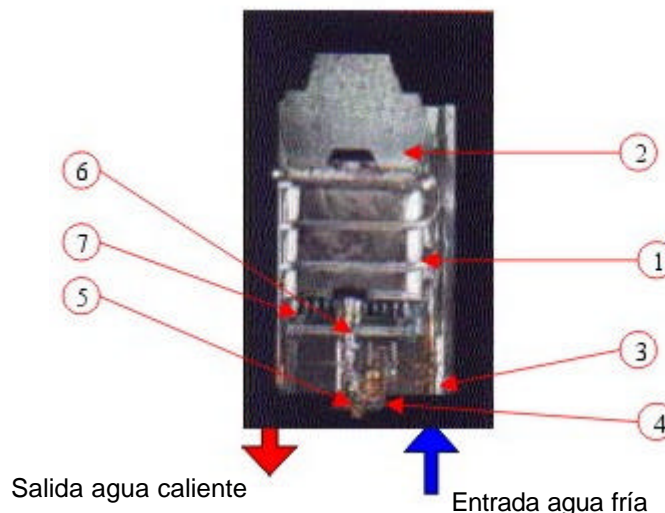


Figura 1.1.1. Detalle interno de un calefón.

El intercambiador de calor

El intercambiador de calor está compuesto por un serpentín de cobre 100 % estañado, dándole una excelente protección, evitando la oxidación del cobre en zonas de alta temperaturas ya que ésta posee un aspecto verdoso desagradable a la vista.

El agua circula por este serpentín siendo ésta una de las pocas desventajas de este artefacto, debido a que suele obstruirse por el sarro. En la actualidad los nuevos procedimientos de soldadura y doblado mejoraron muchísimo este problema, hasta prácticamente extinguirlo.

La figura 1.1.2 a y b muestran un intercambiador de calor típico de un calefón de 14 L.



Figura 1.1.2 Foto de un intercambiador de calor.
a) Vista frontal. b) Vista superior.

Sombrero superior

La evacuación de los gases de la combustión permite diferenciar los tipos de artefactos utilizados. Así, se pueden mencionar tres tipos de aparatos a saber:

- ◆ Sin tiraje.
- ◆ Tiraje natural o cámara abierta.
- ◆ Tiro balanceado o cámara cerrada.

Artefacto sin tiraje

Son aquellos que toman el aire necesario para la combustión y descargan los gases directamente al local.

El ENARGAS (Ente nacional regulador del gas) aprueba este método sólo en cocinas o estufas sin tiraje como pantallas infrarrojas.

Calefón con tiraje natural

Son aquellos que toman el aire necesario para la combustión del local y descargan los gases al exterior por medio de la campana y un tubo – chimenea.

La figura 1.1.3 muestra un calefón de tiro natural.



Figura 1.1.3. Calefones tiro natural

Calefón de tiro balanceado

Son aquellos que toman el aire necesario para la combustión del exterior y descargan los gases al mismo.

Estos tipos de artefactos se diferencian de los anteriores en que son totalmente herméticos, por lo que no existe posibilidad de que los gases queden en el local.

La figura 1.1.4 muestra un calefón tiro balanceado.



Figura 1.1.4 a) Esquema de funcionamiento b) Fotografía

Tubo venturi y cámara de agua.

El funcionamiento del calefón es comandado automáticamente, en caso de que algún grifo de agua caliente se abra, ésta comienza a circular pasando por el tubo venturi, (ver figura 1.1.5).

El agua en la cámara de agua actúa respectivamente sobre cada una de las caras. Ver figura 1.1.6; De este modo, cuando se produce la apertura de algún grifo, por efecto venturi se genera una diferencia de presión sobre las caras, que origina un movimiento del diafragma, que mediante una vinculación actúa sobre la válvula de admisión de gas, encendiéndose así los calentadores principales.

Al cerrar el grifo, un resorte produce que el diafragma regrese a su posición original serrando el paso de gas hacia los quemadores, por lo que éstos se apagan.

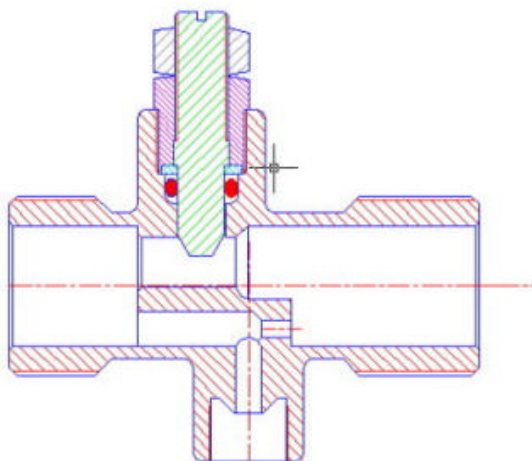


Figura 1.1.5. Corte del tubo venturi.

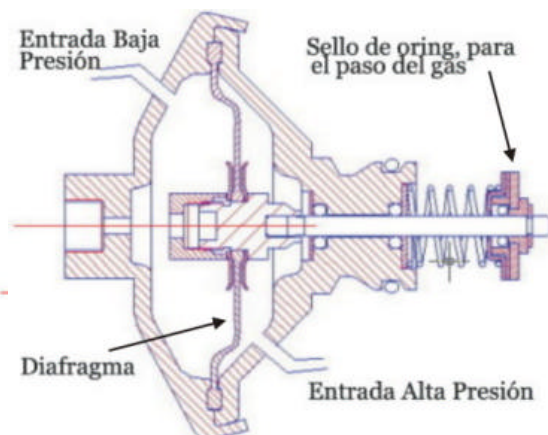


Figura 1.1.6. Corte de la cámara de agua.

Una de las principales desventajas del calefón es que necesita una altura del tanque de agua no inferior a 2.5 metros desde la primer canilla. Esto se debe a que se requiere una presión mínima para que por efecto venturi se genere la diferencia de presión que logre desplazar el diafragma en la cámara de agua. La figura 1.1.6c describe como se conecta el tubo venturi, la cámara de agua y la válvula agua – gas.

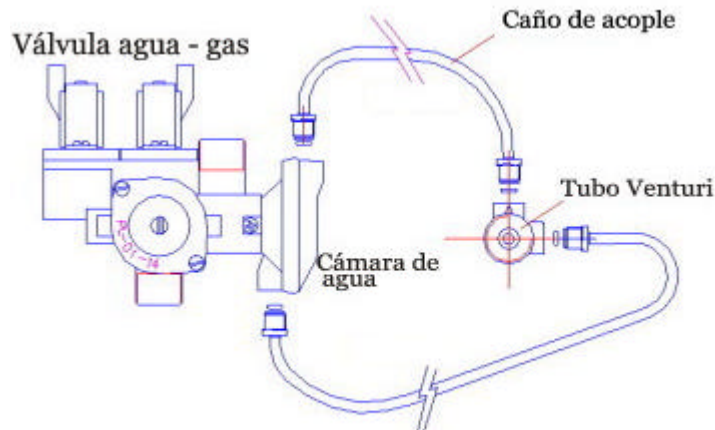


Figura 1.1.6c. Conexión entre la cámara de agua, la válvula y el tubo diferencial.

Válvula agua - gas

La válvula agua – gas es el componente por el cual se conecta el gas natural proveniente de la red. Esta válvula es la destinada a dirigir el flujo de gas hacia el piloto y el quemador principal, dependiendo de la posición de la perilla accionada manualmente por el usuario, y por la cámara de agua como se explicó anteriormente.

En su interior también se encuentra la unidad magnética a la cual se conecta la cola de la termocupla formando un conjunto denominado “sistema de seguridad” que se describirá más adelante.

Dadas las nuevas exigencias del mercado se han desarrollado recientemente nuevos modelos de válvula, los que con ayuda de un circuito electrónico permiten la modulación de la temperatura del agua saliente y se logra que el piloto no permanezca siempre encendido y sólo lo haga cuando se abra la canilla.

Es importante destacar que estos sistemas no son nuevos, ya que antiguamente fueron implementados por equipos de calefacción más grandes y potentes, por lo que solo se tuvo que trasladar la tecnología para que sea utilizada en calefones que hasta el momento no lo requerían.

Los cuatro tipos de válvulas que se pueden encontrar hoy en plaza son:

- ❑ Válvula agua – gas tradicional.
- ❑ Válvula agua – gas sin llama piloto.
- ❑ Válvula agua – gas modulante con llama piloto.
- ❑ Válvula agua – gas modulante sin llama piloto.

Válvula agua – gas tradicional

Estas válvulas, como muestra la figura 1.1.7 son de un diseño compacto y sencillo formadas de un cuerpo de aluminio inyectado. Sus cierres se realizan a través de levas que accionan pastillas de obstrucción que sólo están en contacto con los asientos en el momento del cierre. A diferencia, este sistema disminuye los desgastes producidos en las válvulas de cono, permitiendo alargar la vida útil de la misma.

Su construcción permite una óptima regulación en 225°, obteniendo incrementos de temperatura proporcionales por cada grado en el giro de la maniobra.

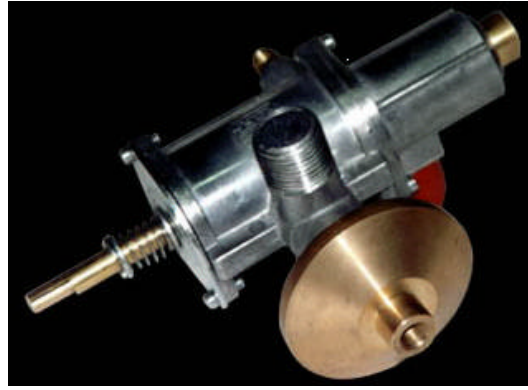


Figura 1.1.7. Válvula convencional a pastilla para calefón fabricado por Del Re hnos. S.R.L.

Válvula agua – gas sin llama piloto

Esta válvula a diferencia de la anterior que es totalmente mecánica, se le incorpora un sistema electrónico que permite la ausencia de la llama piloto.

A este sistema también se lo suele llamar “de manos libres” ya que al adquirirlos solo requieren conectar el agua, el gas, las pilas (dos pilas grandes de 1.5 V) y listo para usar. No requiere la tarea extra de poner la perilla en piloto, encenderlo y esperar 5 minutos para que pegue la unidad magnética y comience el funcionamiento.

La aplicación de este sistema introduce tres grandes ventajas:

De uso: Sistema manos libres (ninguna operación manual) ideal para tiro balanceado.

Economía: Ahorra una cifra considerable de gas por año por el apagado del piloto.

Mantenimiento: El apagado del piloto evita la destrucción prematura del intercambiador de calor y del quemador piloto.

Es importante destacar que este sistema no utiliza termocupla como elemento de seguridad, sino que en su reemplazo utiliza un sistema de ionización, el cual se explica más adelante en *sistemas de seguridad*.

Este tipo de válvula junto a la central electrónica, piloto, solenoide (bobinas) y cámara de agua con su microswitch para dar señal eléctrica pueden observarse en la Figura 1.1.8.

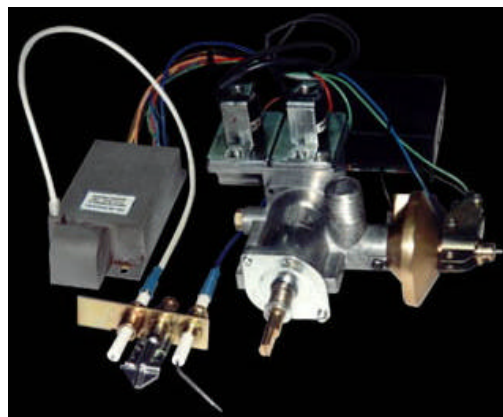


Figura 1.1.8. Válvula sin llama piloto para calefón. Fabricado por Del Re hnos. S.R.L.

Válvula agua – gas modulante con llama piloto

Estos tipos de válvulas trabajan con válvulas solenoides que regulan el caudal de gas. El sistema posee un módulo de control para que el usuario establezca mediante el uso de un botón, la temperatura de salida del agua. La temperatura preestablecida quedará titilando en una pantalla digital por unos segundos y luego la misma pantalla señalará la temperatura de salida del agua en ese instante.

El sistema mantendrá la temperatura establecida aunque se produzcan modificaciones en la presión del gas que lo alimenta o en el caudal de agua.

El agua mantendrá la temperatura siempre que se encuentre dentro de la capacidad del equipo.

Estos equipos poseen una precisión superior a 1°C y trabajan con una alimentación de 12v c.c. 0,5 A. El rango de temperatura que se establece va desde 20 a 60 $^{\circ}\text{C}$.

Este sistema también posee un microswitch sobre la cámara de agua para dar la señal de circulación de agua a la central electrónica, este conjunto se visualiza en la figura 1.1.9.

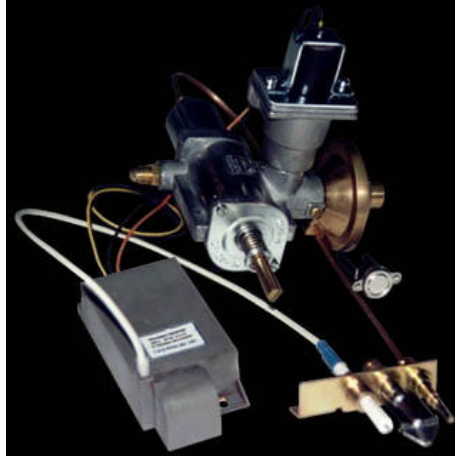


Figura 1.1.9. Válvula modulante con llama piloto para calefón. Fabricado por Del Re hnos. S.R.L.

Válvula agua – gas modulante sin llama piloto.

Este tipo de válvula posee las ventajas de los otros dos sistemas por separado, permitiendo regular la temperatura del agua saliente independientemente del caudal circulante y apagar el piloto cuando no se utiliza y encenderlo automáticamente cuando se abre el grifo de agua caliente.

La figura 1.1.10 muestra este tipo de válvula.

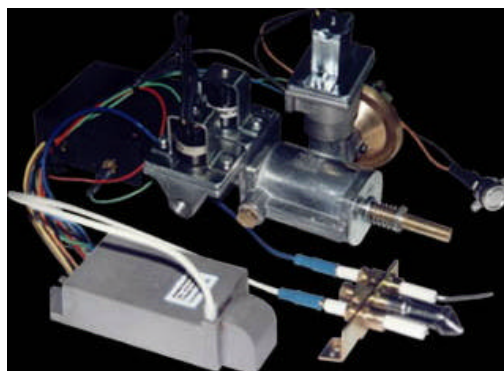


Figura 1.1.10. Válvula modulante sin llama piloto para calefón. Fabricado por Del Re hnos. S.R.L.

Sistema de seguridad

Consiste en un conjunto de elementos que permiten verificar la presencia de llama, tanto en el quemador principal como en el piloto.

Los sensores de llama pueden ser:

- ◆ Térmico eléctrico (Termocuplas).
- ◆ Iónicos (varilla de rectificación).
- ◆ Radiación.

Térmico (Termocuplas)

La termocupla, según se indica en el esquema elemental de la figura 1.1.11, está basada en el principio de que siempre que se conecten dos metales diferentes (En éste caso cobre y constantán*), de manera que formen un circuito completo, se genera una diferencia de potencial entre las uniones que se encuentren a diferentes temperaturas.

Tal como muestra la figura 1.1.12, existen muchos modelos de Termocuplas, diferenciándose en los soportes y roscas de la cola para los diferentes modelos de enganches que cada fabricante diseña.

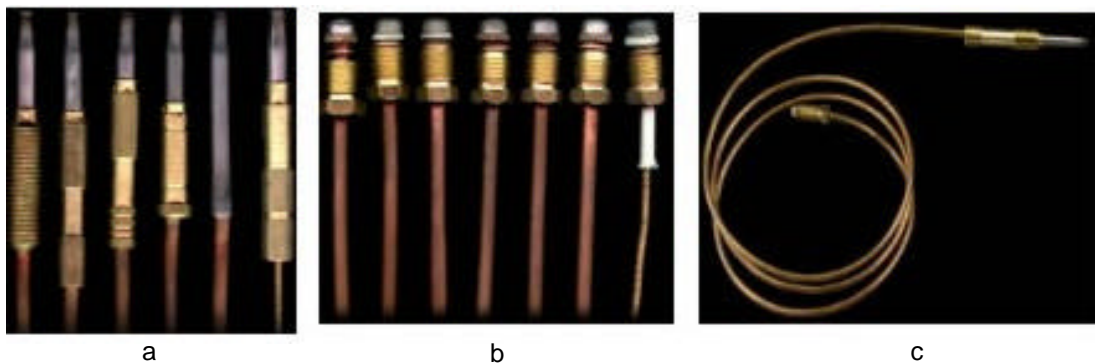
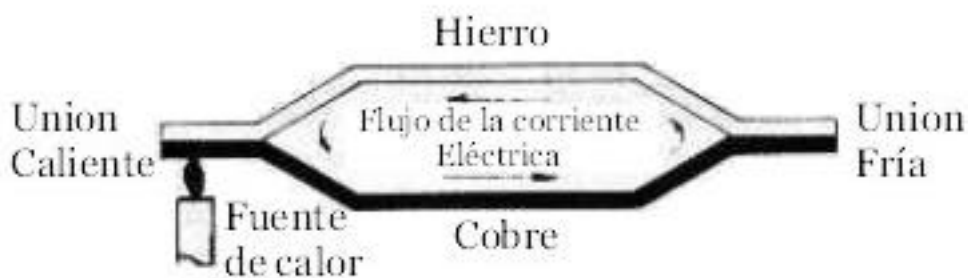


Figura 1.1.12. a) Puntas de Termocuplas b) Colas de diferentes termocuplas. c) Foto de termocupla entera.

La fuente de calor la constituye la llama del piloto o eventualmente el quemador principal, y la unión fría se conecta a una válvula solenoide o válvula electromagnética (también llamada unidad magnética), por medio de conductores eléctricos (un cable de cobre y un caño también de cobre actuando como masa).

Dicha unidad magnética (ver figura 1.1.13) se mantiene abierta cuando circula una corriente eléctrica por su bobina, ésta es originada por la diferencia de potencial que le transmite la termocupla cuando el piloto está encendido.

Cuando la llama del piloto se apaga, las uniones de la termocupla igualan su temperatura, y la diferencia de potencial disminuye hasta prácticamente considerarse despreciable. Luego la acción antagónica de un resorte cierra el paso del gas. Por lo tanto, si por cualquier eventualidad se apaga la llama, éste control corta automáticamente el suministro de gas en la válvula agua – gas.

* Constantán: Aleación de cobre y níquel.



Figura 1.1.13. Unidades magnéticas para válvulas de calefones.

Debido a este sistema, al encender el calefón hay que mantener por unos minutos la perilla de encendido presionada hasta que la termocupla genere el potencial, y por lo tanto la bobina quede pegada. La figura 1.1.14 muestra los gráficos del potencial en función del tiempo generado por la termocupla.

Mili voltios

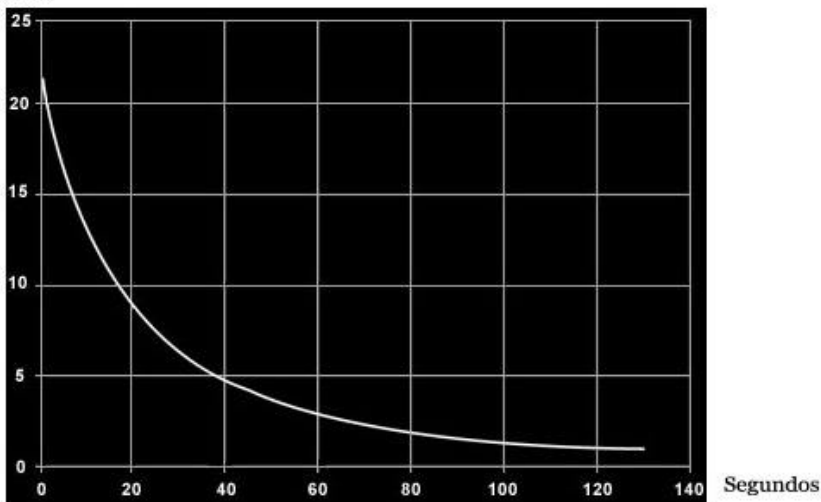


Figura 1.1.14 a) Potencial en función del tiempo de la termocupla al apagarse el piloto

Mili voltios

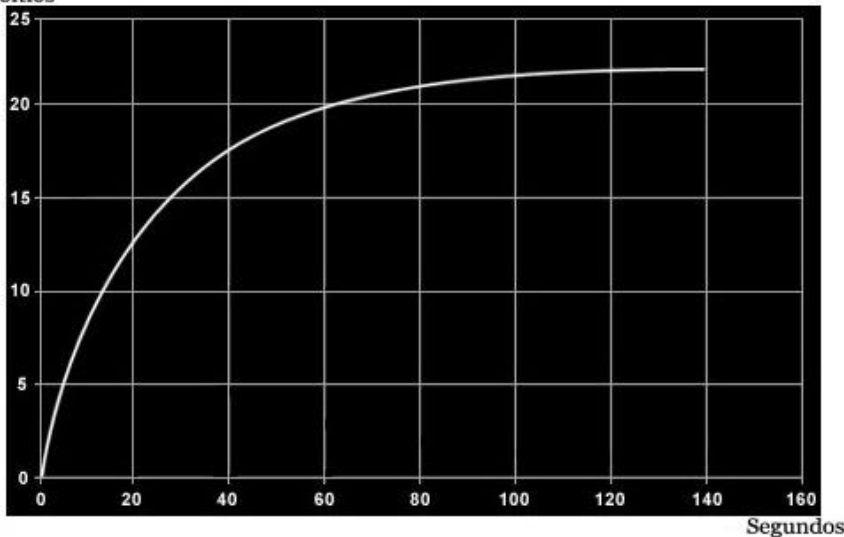


Figura 1.1.14 b) Potencial en función del tiempo de la termocupla al encenderse el piloto

Iónicos (varilla de rectificación)

La presencia de la llama puede ser detectada por la conductibilidad eléctrica de la misma.

En efecto, a altas temperaturas las moléculas de combustible y el aire circulante se ionizan, haciéndose conductora y permitiendo circular corriente en un sólo sentido, es decir, se rectifica la corriente de alterna en continua.

Para aprovechar este efecto se utiliza una varilla o sonda de detección, que consiste en un electrodo sumergido en la llama principal o piloto, de modo que al apagarse la llama cesa la circulación de corriente, lo que provoca el cierre de la válvula de seguridad, produciéndose el corte del suministro del gas prácticamente en forma instantánea.

Radiación

Consiste en la detección de la llama por efecto de la radiación, provocada sobre un elemento sensible, que se denomina célula fotoeléctrica o fotocélula.

Estos detectores se basan en la captación de las radiaciones que se producen en el proceso de combustión, pudiendo actuar de acuerdo a la característica de funcionamiento, dentro de la gama infrarroja o la ultravioleta.

Los detectores del tipo infrarrojo detectan los destellos que se producen en la llama, mientras que los ultravioletas reaccionan en la zona de combustión primaria, donde tiene lugar la reacción entre el combustible y el comburente.

El piloto

Cualquier tipo de quemador* pueden clasificarse de acuerdo a los siguientes:

Presión de trabajo:

- ◆ Baja presión: puede estimarse en general, hasta 350 mmca**.
- ◆ Alta presión: cuando se supera el valor anterior.

* Quemador: Dispositivo destinado a producir la mezcla íntima del combustible y el comburente (oxígeno del aire).

** mmca: Milímetros de columna de agua, utilizada como unidad de presión.

Forma de incorporación del aire:

- ◆ Atmosféricos: cuando el aire de la combustión es tomado en forma directa de la atmósfera.
- ◆ Aire a presión: cuando cuenta generalmente con un ventilador centrífugo para proporcionar el aire indispensable para producir la combustión.

Para producir en forma rápida, eficiente y segura el encendido del quemador principal en el momento que sea necesario, se emplea en determinados artefactos un quemador de bajo consumo, denominado *piloto*. La figura 1.1.15 muestra distintos pilotos utilizados por diferentes empresas que comercializan calefones.

Los pilotos de los quemadores de los artefactos domésticos son atmosféricos a baja presión, y su encendido y funcionamiento es independiente del quemador principal.



Figura 1.1.15 Pilotos típicos para calefones.

El quemador principal o mechero

El quemador es el elemento que permite realizar la reacción de combustión entre el combustible y el comburente de manera controlada y regulable. Es decir, asegurar la aportación adecuada de ambos para conseguir la potencia calórica especificada, y distribuye la zona de reacción (llama) y la circulación de los productos de combustión de modo que el calor producido se transfiera a la carga de manera eficiente.

En la figura 1.1.16 se muestran los quemadores para calefones de distintas capacidades.

Al tomar el aire de la combustión directamente de la atmósfera en forma natural, se los denomina atmosféricos o también tipo bunsen. En el ANEXO B se describe el esquema de funcionamiento de este tipo de quemadores.

El aire primario es el aire introducido en el quemador, que se mezcla con el metano antes de que salga por el orificio de descarga, mientras que el aire secundario, es el aire exterior que toma directamente la llama, en la zona que se produce la combustión.

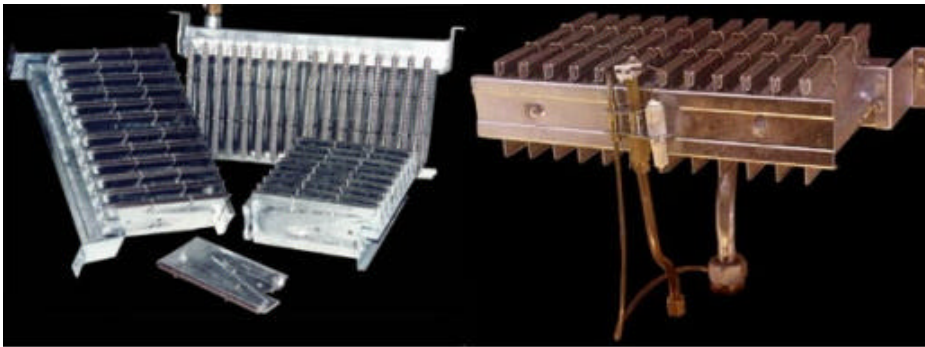


Figura 1.1.16. Quemadores principales para calefón.

Los elementos geométricos básicos del quemador atmosférico de premezcla son:

- ◆ Inyector: Pieza con abertura calibrada desde donde se descarga el gas combustible, tal como muestra la figura 1.1.17.
- ◆ Mezclador: Donde el gas y el aire arrastrado se mezclan, buscando siempre alivio de presiones y buen contacto entre aire y gas.
- ◆ Cabeza: Donde se efectúa la combustión de la mezcla aire - combustible, al fluir la mezcla por la boquillas.

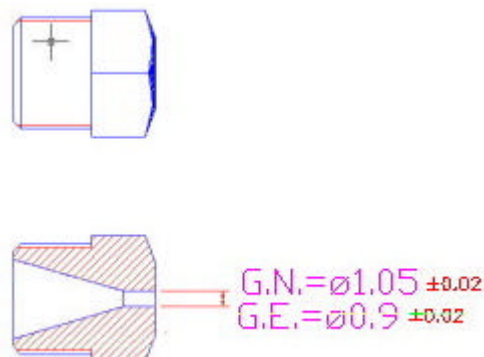


Figura 1.1.17. Inyector para quemador gas natural y envasado para quemador principal

2. Introducción a la combustión en pilotos normales

2.1 Introducción a la combustión y estequiometría de las reacciones.

Se define combustión como una combinación química, con desprendimiento de calor y luz, del oxígeno del aire con el carbono e hidrógeno que constituyen los elementos activos de los combustibles.

De esa manera, entonces, para que haya combustión es necesario la existencia de un cuerpo llamado combustible (en éste caso el gas natural), y otro llamado comburente formado por el oxígeno contenido en el aire.

Para que pueda producirse o iniciarse la combustión, es necesario que exista una temperatura lo suficientemente elevada, dependiendo del combustible, llamada temperatura de encendido o temperatura de ignición.

Para que la combustión entre el gas natural y el aire se origine, la temperatura de ignición es aportada por una pequeña chispa eléctrica o el calor de una llama.

Toda reacción química de combustión puede expresarse de la forma siguiente:

Reactantes → Productos

ó

Combustible + Comburente → Producto

Cuando tiene lugar ésta reacción, los enlaces de la molécula de los reactivos se rompen, y los átomos y electrones se agrupan para formar los productos.

En las reacciones de combustión, la oxidación rápida de los elementos reactivos del combustible trae como consecuencia la liberación de energía al formarse los productos de la combustión. Los tres elementos activos más importantes en los combustibles habituales son el carbono (C), el hidrógeno (H) y el azufre (S).

En el caso de estudio el elemento combustible es el gas natural, por lo que es imprescindible conocer la composición del mismo.

La tabla 2.1.1 describe las especificaciones de calidad del gas natural para el producto suministrado a los consumidores.

Contenido máximo de:	
Dióxido de Carbono (CO ₂)	2,5 % molar
Agua (H ₂ O)	65 mg/m ³ n
Total de Inertes (N ₂ + CO ₂)	4,5 % molar
Sulfuro de Hidrógeno (SH ₂)	3 mg/m ³ n
Azúfre Entero (s)	15 mg/m ³ n
Oxígeno (O ₂)	0,2 % molar
Partículas Sólidas	22,5 kg/MM de m ³ n
Partículas Líquidas	100 l/MM de m ³ n
Poder Calorífico Superior	Mín. 8850 Kcal/m ³ n máx. 10200 Kcal/m ³ n
Otras Consideraciones	Libre de arena, polvos, gomas, aceites, glicoles y otras impurezas indeseables

Tabla 2.1.1. Especificaciones de calidad del gas natural para el producto suministrado a los consumidores.
Fuente: Ente Nacional Regulador de Gas (ENARGAS), Resolución ENARGAS N° 622/98.

En el caso más desfavorable la composición del gas natural será de un 96 % de CH₄ (metano) y un 4 % de impurezas, el azufre que contiene es prácticamente despreciable ya que éste es eliminado antes de que el gas entre en los gasoductos, el motivo de su separación es por ser el causante de la oxidación de las cañerías que los transportan.

Dados estos valores, a fines prácticos se considera el gas natural como 100 % de CH₄.

Para poder finalizar el análisis de los reactantes falta definir el comburente, siendo en este caso el oxígeno existente en el aire.

El aire es una materia prima prácticamente inagotable, constituida por una mezcla de gases, incolora, inodora e insípida. Está compuesto en un 99 % de O₂ y N₂ y el resto son gases nobles, vapor de agua en cantidad variable, dióxido de carbono, etc dependiendo de la zona geográfica e industrial, tal como muestra la tabla 2.1.2.

Elemento	% en volumen	% en peso
Nitrógeno (N ₂)	78,14	75,6
Oxígeno (O ₂)	20,92	23,1
Argón (Ar)	0,94	0,3
Neón (Ne)	0,0015	0,001
Helio (He)	0,0005	0,00007
Criptón (Kr)	0,0001	0,0003
Hidrógeno (H ₂)	0,00005	0,0000035
Xenón (Xe)	0,00001	0,00004

Tabla 2.1.2 Composición media del aire puro (capas bajas)

Fuente: Dr Ángel Vian Ortuño, Introducción a la química industrial, Editorial Reverté S.A., Segunda Edición, España 1998, Página 49.

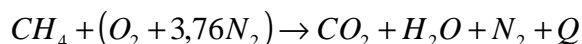
Dado que el 99 % del aire esta constituido por N₂ y O₂, a fines prácticos y obteniendo muy buenos resultados se considera al aire compuesto por 21 % de O₂ y 79 % de N₂.

Es decir que cada mol de O₂ va acompañado por 3,76 moles de N₂, teniendo 4,76 moles de aire.

Combustión completa

Una reacción se denomina combustión completa cuando todo su carbono se ha combinado para formar dióxido de carbono (CO₂) y todo su hidrógeno en agua (H₂O).

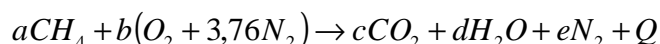
Esto es:



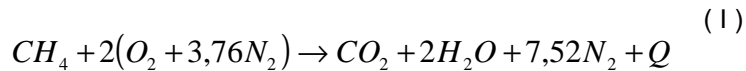
Siendo Q la energía en forma de calor liberada por la reacción de combustión.

En toda reacción química se cumple el principio de conservación de masa, el cual establece que la masa total de los productos debe ser igual que la de los reactantes.

Siendo a, b, c, d, e los coeficientes estequiométricos, la reacción será:



$$\begin{cases} a = C & a = 1 \\ 4a = 2d & c = 1 \\ 2b = 2c + d & d = 2 \\ 2 * 3,76b = 2e & b = 2 \\ & e = 7,52 \end{cases}$$



En este caso, la ecuación indica que 1 mol de CH_4 se combina con 2 moles de O_2 para dar 1 mol de CO_2 y 2 moles de H_2O . El N_2 presente en el aire no reacciona, es decir que si los gases de la combustión no se encuentran a altas temperaturas (aproximadamente $1500\text{ }^\circ\text{C}$), se considera al nitrógeno inerte. En cambio si los gases de combustión están a altas temperaturas, el N_2 forma algunos óxidos de nitrógeno (NO_x) perjudiciales para el medio ambiente y la salud de las personas.

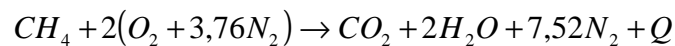
Combustión incompleta:

Para que un combustible arda completamente, es necesario que el hidrógeno y el carbono contenidos en el mismo se transformen por reacción con el oxígeno en agua y en dióxido de carbono. Si la transformación se realiza parcialmente, la combustión se denomina incompleta dando lugar en este caso a la presencia de cierta cantidad de monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) sin reaccionar y carbono (C) libre.

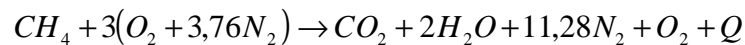
Combustión estequiométrica

Se denomina combustión estequiométrica cuando la mezcla de combustible y oxígeno, contiene la cantidad precisa o estequiométrica de oxígeno para quemar por completo todos los elementos combustibles, es decir que se produzca una combustión completa. En los reactantes no hay exceso ni deficiencia de oxígeno, esto implica que no existe oxígeno libre en los productos de la reacción.

La reacción (1) que se detalló anteriormente describe una combustión completa y estequiométrica. Esta es:



En cambio la siguiente reacción describe una combustión completa *no estequiométrica*, conteniendo mas aire que el estequiométrico:



Razón aire – combustible y aire en exceso

Dos parámetros frecuentemente utilizados para cuantificar las cantidades de combustibles y de aire en un proceso particular de combustión son la relación aire – combustible (AC) y su inversa combustible – aire (CA).

La razón AC puede expresarse en términos de números de moles o por masa (AC_m).

$$AC = \frac{\text{Cantidad de aire (en moles)}}{\text{cantidad de combustible (en moles)}}$$

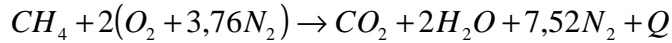
Si la masa molecular respectivas son:

$$M_{\text{aire}} = 28,97 \text{ Kg/Kmol}$$

$$M_{CH_4} = 16,04 \text{ Kg/Kmol}$$

$$AC_m = AC \frac{M_{\text{aire}}}{M_{CH_4}} = 1,806 AC$$

Es de interés conocer la razón AC estequiométrica (AC_e), para lo cual la ecuación de combustión estequiométrica y completa (ecuación 1) nos indica:



Si 3,76 moles de N_2 + 1 mol de O_2 forman 4,76 moles de aire y el coeficiente estequiométrico es 2, se tiene que por cada mol de CH_4 se requiere una cantidad estequiométrica de 9,52 moles de aire, y la razón aire combustible estequiométrica es:

$$AC_e = \frac{9,52}{1} = 9,52$$

Normalmente la cantidad de aire suministrado no coincide con la teórica. La cantidad de aire realmente suministrado en un proceso de combustión se expresa habitualmente en términos del porcentaje del aire estequiométrico.

Si se designa AC_e como el 100% del aire teórico, y el aire en exceso esta dado por:

Aire en exceso = $AC - AC_e$

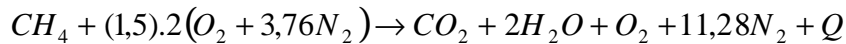
el % de aire en exceso será:

$$\text{Aire en exceso} = \frac{(AC - AC_e)100}{AC_e} = \left(\frac{AC}{AC_e} - 1 \right) \cdot 100$$

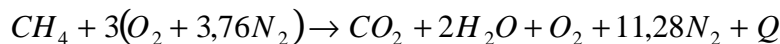
Por ejemplo, considérese la combustión completa del metano con un 150% del aire estequiométrico (50 % de exceso de aire). La ecuación química ajustada es:

$$50 = \left(\frac{AC}{AC_e} - 1 \right) \cdot 100 \Rightarrow \frac{AC}{AC_e} = \frac{50}{100} + 1 \Rightarrow AC = 1,5 AC_e$$

$$\frac{AC}{AC_e} = A_{ex} = 1,5$$



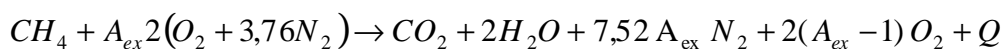
=



En un caso genérico de combustión completa del metano con aire en exceso y una relación $AC/AC_e = A_{ex}$ se demuestra que:



$$\begin{cases} a = b \\ 4a = 2c \\ 4A_{ex} = 2b + c + 2e \\ 7,52A_{ex} = d \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = 1 \\ b = 1 \\ c = 2 \\ e = 2A_{ex} - 2 \Rightarrow e = 2(A_{ex} - 1) \\ d = 7,52A_{ex} \end{cases}$$



Para lograr una combustión completa, es necesario ante todo mezclar el combustible con una cantidad suficiente de aire, es decir trabajar con exceso de aire para asegurar que todo el hidrocarburo encuentre el oxígeno necesario para reaccionar.

Un exceso de aire demasiado fuerte produce efectos negativos, ya que hace bajar la temperatura de combustión y consiguientemente reduce el rendimiento de los equipos.

La cantidad de aire en exceso varía según el tipo, dimensiones y disposición de los quemadores en las cámaras de combustión.

Poderes caloríficos de un combustible

El poder calorífico de un combustible es la transferencia de calor (por mol unitario o masa unitaria de combustible) que ocurre en la combustión completa del combustible en aire en el estado de referencia estándar de 25 °C y 1 atm.

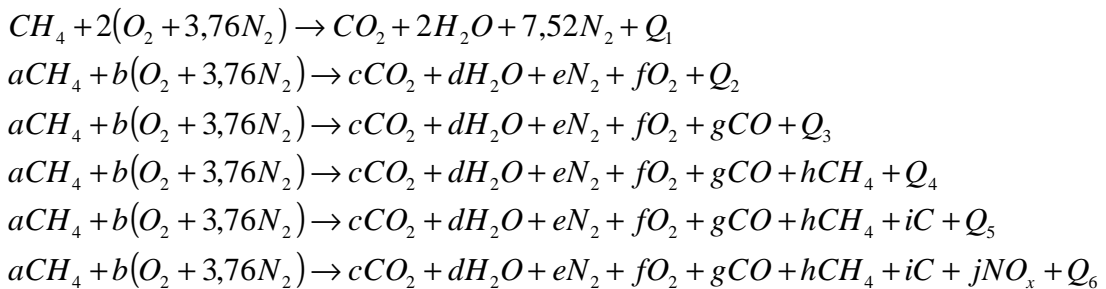
Se distinguen dos poderes caloríficos, el superior y el inferior. El poder calorífico superior (PCS) se obtiene cuando toda el agua formada en la combustión es líquida; el poder calorífico inferior (PCI) se obtiene cuando todo el agua formada en la combustión es gaseosa. El PCS excede al PCI en la energía necesaria para evaporar el agua formada, es decir que cuando el agua está en estado líquido es porque liberó al exterior una cantidad de calor igual al calor latente de evaporización, es por este motivo que:

$$PCS > PCI$$

En el calefón como en cualquier otro artefacto doméstico, el producto aprovechable del proceso de combustión **no** es el H₂O ni el CO₂, sino el calor (Q) que se libera por la reacción de combustión. Si una cantidad de combustible *m* se quema, la cantidad de calor Q en una combustión completa y estequiométrica se determina de la siguiente manera:

$$Q = m \cdot PCI$$

En todos procesos reales la combustión es incompleta, esto genera una disminución del rendimiento del artefacto ya que si consideramos las siguientes ecuaciones, desde una combustión completa y estequiométrica, hasta una reacción incompleta en diferentes grados, el calor Q de la reacción será:



$$Q_1 > Q_2 > Q_3 > Q_4 > Q_5 > Q_6$$

La tabla 2.1.3 especifica el poder calorífico para cálculos del gas natural en Argentina.

FUENTE	PCS (Kcal/m ³ n)	PCI (Kcal/m ³ n)
Gas Natural	9300	8300

Tabla 2.1.3 Poderes caloríficos del gas natural en Argentina para cálculos
Fuente: Revista Gas & Gas, Publicación para la industria gasífera, Abril 2001, página 76

Datos experimentales de la estequiometría de la combustión en pilotos

Si se especifica el combustible y la combustión es completa, las cantidades respectivas de los productos pueden determinarse aplicando el principio de conservación de masa a la ecuación química. El procedimiento para obtener la ecuación química ajustada de una reacción real cuya combustión sea incompleta no es siempre tan directo.

Aunque la cantidad de aire suministrada en un proceso de combustión real puede ser mayor que la estequiométrica, es frecuente la aparición entre los productos de algo de monóxido de carbono (CO), de oxígeno (O₂) no utilizado y de hidrocarburo sin reaccionar (CH₄). Esto se puede deber a un mezclado insuficiente, a un tiempo escaso para completar la combustión, o a otros factores. Frente a los casos de combustión real, los productos de una combustión incompleta y sus cantidades relativas solamente se pueden determinar experimentalmente.

En la tabla 2.1.4., se observan los valores obtenidos del análisis de los gases de combustión realizado con tres pilotos normales. Con un medidor de gases de combustión marca Testo, modelo 325-1 se registran los valores de CO, CO₂ y O₂.

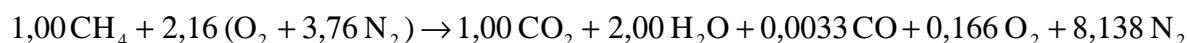
Marca	del inyector (mm)	Sección entrada aire primario (mm ²)	Cabeza	CO (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Rheem S.A.	0,3	11	Mono llama	0,04	12	2
Orbis S.A.	0,3	12,5	Mono llama	0,04	12	2,8
Orbis S.A.	0,4	29	Tres llamas	0,06	12,08	2,5

Tabla 2.1.4. Ensayos de los gases de combustión de tres modelos de pilotos.

Fuente: Del Re Hnos. S.R.L.

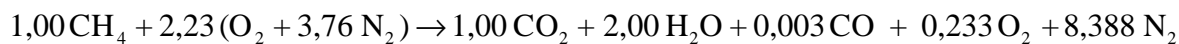
Dados los valores de la tabla 2.1.4, se resuelve la ecuación II obteniendo las siguientes reacciones:

Rheem.



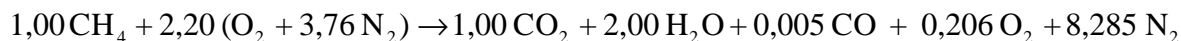
con un porcentaje de aire en exceso de 8,3 %

Orbis mono llama.



con un porcentaje de aire en exceso de 11,6 %

Orbis tres llamas.



con un porcentaje de aire en exceso de 10,2 %

2.2 Combustión del metano

En toda combustión resulta de interés poder predecir y controlar el proceso, para lo cual es necesario saber como es que éstas reacciones se producen.

La estequiometría indica cuanto de un elemento se combina con cierta cantidad de otro para darnos una cierta cantidad de producto, pero en ningún momento indica como es el proceso o etapas por la cual se producen esas reacciones.

A la descripción detallada, paso a paso, de una reacción química se denomina mecanismo, y las condiciones que se deben cumplir para que ése mecanismo sea factible lo explica la teoría de colisiones de la velocidad de reacción.

Teoría de colisiones de velocidad de reacción:

Para que la reacción del metano con el oxígeno se produzca, debe chocar una molécula del metano con una molécula de oxígeno. A temperatura ambiente y una atmósfera de presión ocurren cerca de 10^{31} colisiones por litro y por segundo, pero no todas esas colisiones son efectivas ya que cada encuentro entre las moléculas debe cumplir dos condiciones.

La primer condición que deben cumplir es que las moléculas estén alineadas correctamente al producirse la colisión, la segunda condición es que la energía producida al colisionar, sea tal que produzca la reacción. Esto es ya que se requiere una energía mínima para que se produzca la reacción denominada energía de activación E_{act} .

La figura 2.2.1 indica la energía potencial en función del avance de la reacción y las energías de activación para reacciones de una sola etapa y la figura 2.2.2 para reacciones con radicales libres*.

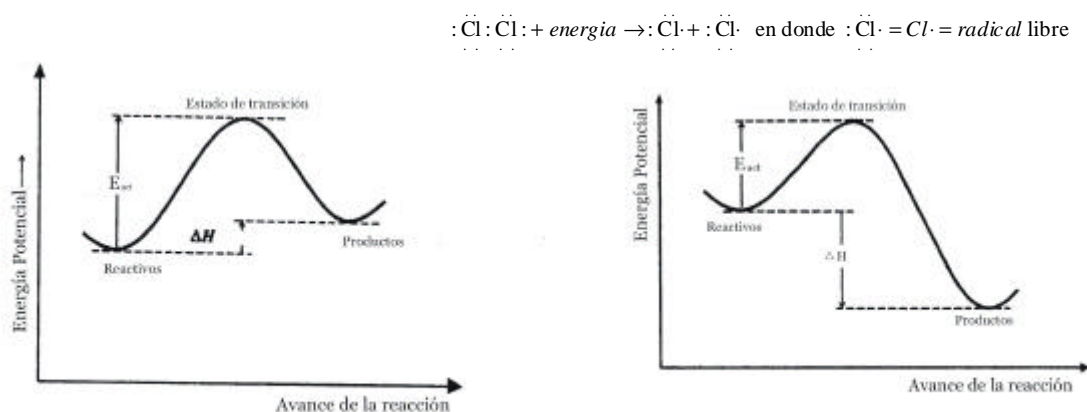


Figura 2.2.1. Cambios de energía potencial durante el avance de la reacción. a) una reacción endotérmica, b) una reacción exotérmica.

Fuente: Robert T. Morrison y Robert N. Boyd, Química orgánica, Editorial Addison-Wesley Liberoamericana., Quinta Edición, New York University, Página 53 y 66

* Radical libre: Es un átomo o grupo de átomos que posee un electrón impar (no apareado), denotado $Ax\cdot$ ejemplo: al aportar energía a la molécula de cloro (Cl_2), se rompe el enlace covalente de modo que cada átomo retiene un electrón del par quedando un electrón impar no apareado como el resto de los electrones.

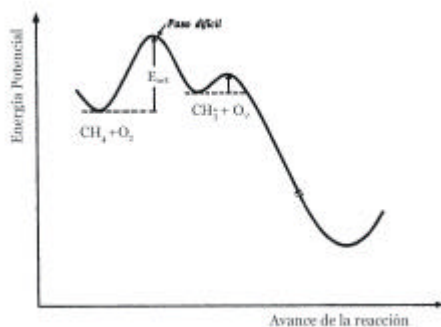


Figura 2.2.2. Cambios de energía potencial durante el avance de la reacción con radicales libres.
 Fuente: Robert T. Morrison y Robert N. Boyd, Química orgánica, Editorial Addison-Wesley Liberoamericana., Quinta Edición, New York University, Página 61

Una reacción química es el resultado de colisiones suficientemente energéticas y adecuadamente orientadas. La velocidad de reacción, en consecuencia es la velocidad a la que suceden estos impactos efectivos, por lo que la velocidad de reacción puede expresarse por el producto de tres factores, y todo lo que afecte a cualquiera de estos tres factores afectará a la velocidad de reacción.

Uno de los factores se denomina *factor de probabilidad* (P) y expresa la probabilidad de que una colisión tenga la orientación adecuada para producir la reacción. Otro factor es la *frecuencia de colisiones* (FC), expresando el numero total de colisiones (efectivas o no) por m³ y por segundo. El ultimo factor es el *factor energético* indicando la fracción de colisiones suficientemente energéticas.

El factor energético depende de la temperatura, que se puede controlar, y de la energía de activación característica de cada reacción.

La velocidad de reacción resulta:

$$V_{reacción} = P * FC * e^{-E_{act}/RT}$$

La velocidad de reacción puede modificarse cambiando la presión, la concentración y la temperatura en la que tiene lugar la reacción (ver tabla 2.2.1), esto se debe a que aumentando la concentración o la presión, aumenta la frecuencia de las colisiones ya que las partículas se encuentran más aglomeradas. Un variación en la temperatura también producirá una variación en la velocidad de reacción, en primer lugar porque produce una variación de la energía cinética y por lo tanto una variación en la frecuencia de colisiones, y en segundo lugar y el mas importante porque produce una variación en el factor de energía como expresa la ecuación de velocidad de reacción.

Temperatura °C	Concentración		
	2 CH ₄ + O ₂	CH ₄ + O ₂	CH ₄ + 2 O ₂
560 - 617	22,7	48,6	66,7
617 - 666	53,6	50,9	57,3

Tabla 2.2.1 Energías de activación totales en Kcal/mol de CH₄
 Fuente: Giuliano Salvi, La combustión teoría y aplicaciones, Editorial Dossat S.A. Segunda Edición, Página 33.

Mecanismo de reacción

La oxidación de los hidrocarburos ha sido estudiada desde hace muchos años, y todavía hoy es parcialmente desconocida en algunas de sus facetas más significativas.

Esto se debe a la complejidad de las reacciones que intervienen (y de la consiguiente dificultad de investigación), así como de la enorme rapidez con que se suceden las distintas etapas. Aun las llamas más simples es el resultado de muchas reacciones químicas casi simultáneas, cuyo estudio requiere la resolución de problemas de aerodinámica, de conducción del calor y de difusión molecular, es decir magnitudes químicas – físicas que caracterizan en cada momento la mezcla reactiva.

Dado que las reacciones químicas son generalmente mucho más rápidas; en diversos tipos de combustión, la mezcla del combustible con el oxidante constituye de hecho el paso que determina la velocidad total del conjunto.

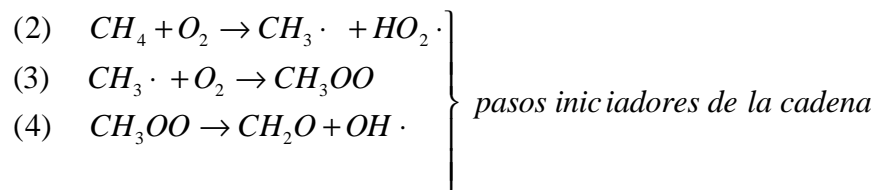
A pesar de que el mecanismo de esta reacción es muy complicado y aún no se conoce bien, parece indudable que se trate de una reacción en cadena de radicales libres.

Esta reacción en cadena comprende varios pasos, cada uno de los cuales genera una sustancia reactiva que genera el paso siguiente. El primer paso se denomina iniciador de la cadena, éste da lugar al segundo paso denominado propagadores de la cadena y por último está el paso finalizadores de la cadena.

Lewis y Von Elbe han revisado recientemente el mecanismo de la oxidación del metano, y observaron que un aumento de la concentración del metano producía un aumento de la velocidad de reacción, o un aumento de la concentración en formaldehídos (HCHO o CH₂O).

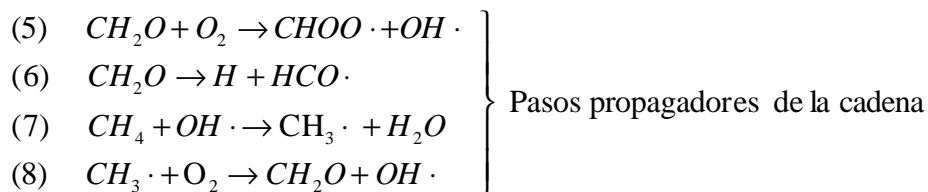
El mecanismo de reacción propuesto por ellos, se basa en una reacción en cadena, con formación en primer término de pequeñas cantidades de formaldehído, por reacción espontánea entre metano y oxígeno, y después de continuadores de cadena por interacción del formaldehído con oxígeno.

El mecanismo propuesto es:



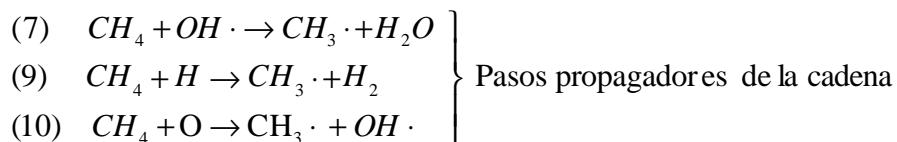
Dada la reacción de la ecuación (3), con energía cero de activación ($E_{act} = 0$) y un factor de frecuencia de $10^{11} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$ se lleva a cabo el proceso monomolecular que describe la ecuación (4).

El formaldehído inicia entonces cadenas por reacción con oxígeno:



Se observa que en la reacción en cadena se forman y se destruyen formaldehídos (CH₂O) y radicales libres. De esta forma, la concentración del formaldehído crece al principio exponencialmente con el tiempo hasta llegar a un valor constante, el cual corresponde al equilibrio entre la velocidad de formación y la de descomposición.

En los pasos propagadores de la cadena, se cree que los caminos más probables para la desaparición del metano son:

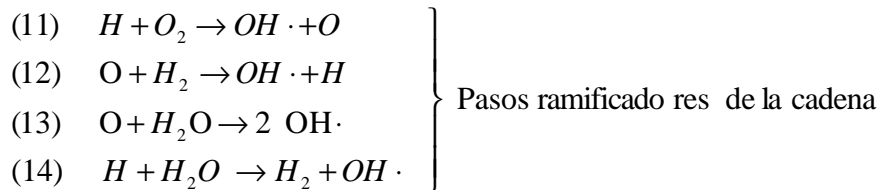


Las tres reacciones (7), (9) y (10) son moderadamente exotérmicas y con energías de activación relativamente bajas.

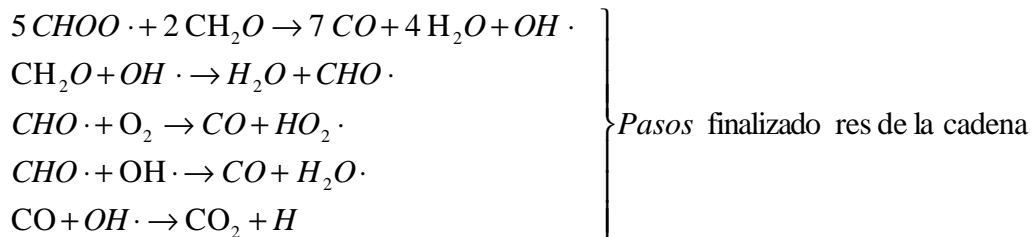
En mezclas de metano – oxígeno pobres en metano, dado a la cantidad de oxígeno presente en estas llamas, la concentración de H es muy baja con respecto a la del OH y O, por lo cual se desprecia la ecuación (9).

En el caso de llamas ricas en combustible, predomina la reacción (9) y la velocidad de reacción de la ecuación (10) es muy lenta y constituye sólo en pequeñas proporción a la desaparición del metano.

Las reacciones (11), (12), (13) y (14) son las causantes de la ramificación de la cadena, que llevan a la proliferación de radicales esenciales para todas las demás reacciones.



Por último resulta:



Según los datos experimentales, los perfiles de concentración en llamas laminares, como muestra la figura 2.2.3, pueden dividirse en tres zonas. La primera va del borde del quemador $z = 0$ a $z = 0,2$ cm, y corresponde a la zona donde las variaciones de composición y de temperatura se deben exclusivamente a los procesos de transporte molecular.

En el punto en que la llama alcanza los 1300 °K aproximadamente, se inicia la zona en que se producen las reacciones químicas ($z = 0,2$ y $z = 0,3$ cm), en donde el metano desaparece para dar lugar al H_2O , H_2 y CO. Después sigue la tercer zona, mas larga, en la cual el CO se convierte lentamente en CO_2 ; esta zona corresponde también en la figura 2.2.4 a los tramos casi rectilíneos de la curva de la velocidad de reacción.

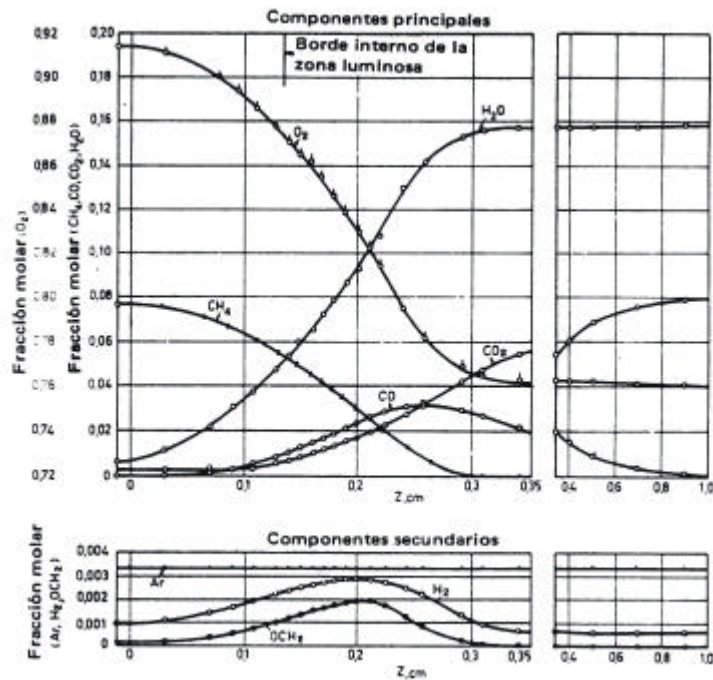


Figura 2.2.3 Perfil de concentración en una llama laminar metano – oxígeno a Pr = 0,1 atm
 Fuente: Giuliano Salvi, La combustión teoría y aplicaciones, Editorial Dossat S.A.
 Segunda Edición, Página 35.

Los perfiles de las velocidades del metano, obtenidos de los de concentración, como indica la figura 2.2.4, son siempre negativos e indican que el metano experimenta una neta pérdida de concentración para desaparecer después completamente. En el mismo tiempo, el H₂O, CO y H₂ muestran velocidad de formación positiva, con un pico en los dos primeros que corresponde a la máxima bajada del metano; por consiguiente, la velocidad de reacción de estas sustancias se hace negativa, lo cual indica que tienden a transformarse.

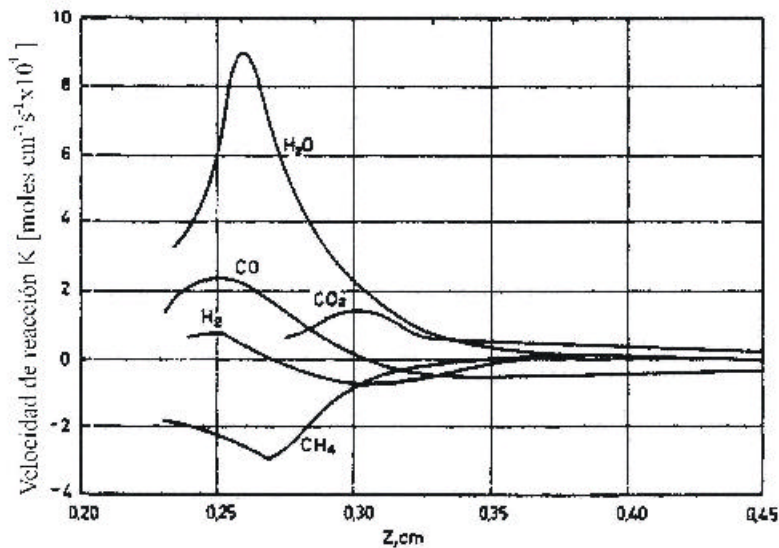


Figura 2.2.3 Velocidad de reacción en una llama laminar metano – oxígeno a Pr = 0,1 atm
 Fuente: Giuliano Salvi, La combustión teoría y aplicaciones, Editorial Dossat S.A.
 Segunda Edición, Página 36.

En la figura 2.2.3 y 2.2.4 no se encuentran graficados las concentraciones de los iones que se producen en las llamas, esto se debe ya que hasta temperaturas por debajo de 1800 °C puede hacerse caso omiso del fenómeno de disociación de los gases quemados, dado que sus concentraciones son bajas y no afectan los resultados de la combustión.

En cambio a partir de los 2000 °C este fenómeno cobra mucha importancia condicionando los resultados de la combustión (debido a las elevadas características endotérmicas de las reacciones de disociación); por ejemplo, una llama con relación metano – oxígeno $\frac{1}{2}$ contiene cerca del 20 % de radicales y átomos libres, reduciendo la temperatura de llama de 5050 °C (valor teórico) a solo 2740 °C.

2.3 Estabilidad de llama en la combustión

Las llamas pueden definirse como reacciones de combustión que se propagan a través del espacio, a velocidad inferior a la del sonido acompañadas normalmente de radiación visible. Está claro que esta definición no considera las detonaciones ya que estas pueden llegar a velocidades mayores que la del sonido.

El estudio de los fenómenos ligados a la combustión se realiza en campos que pertenecen tanto a la química como a la física; en las condiciones de llama estable son los factores físicos los que asumen un papel más importante.

Límites de inflamabilidad

Todo gas o vapor que tiene la propiedad de formar mezclas inflamables, sólo pueden formarlas cuando la composición de la mezcla (porcentaje de combustible en el comburente) queda comprendida entre dos límites. Toda mezcla que quede comprendida entre estos dos límites es apta para la autopropagación de la llama de una capa a otra, en caso contrario la llama se extinguirá al separarla del foco de ignición.

El límite inferior de ignición es por defecto de combustible, en cambio el límite superior es por exceso del mismo, o lo que es lo mismo por defecto del comburente.

La tabla 2.3.1 muestra los límites de inflamabilidad para algunos gases importantes en donde se encuentra el metano.

Gas	Límites en aire %		Límites en oxígeno %	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Hidrógeno	4,1	74	4	94
Metano	5,3	14	5,4	59
Etano	3,2	12,5	—	50
Propano	2,4	9,5	—	—

Tabla 2.3.1 Límite de inflamabilidad de ciertos gases en aire y en oxígeno a presión atmosférica.
Fuente: Kirk - Othmer, Enciclopedia de tecnología química, Tomo VII, Página 595.

La inflamabilidad es una función de la composición de la mezcla, la temperatura y la presión, pero es independiente de los medios de inflamación. Las variaciones de la presión atmosférica no afectan perceptiblemente los límites de inflamabilidad, pero las variaciones mayores producen efecto notables; esto es de suma importancia ya que los pilotos y los quemadores de los calefones trabajan a presión atmosférica, la cual varía según el día.

Al producirse un foco de inflamación, como una chispa eléctrica, en una mezcla inflamable, la llama se propagaría en forma de esfera expansiva si no fuera que la convección deforma la llama. Por este motivo se encuentra que los límites para propagación horizontal de llama son algo más estrechos que los de propagación hacia arriba, y son aún más estrechos los de propagación hacia abajo. Los datos experimentales encontrados para el metano en aire son: propagación hacia arriba 5,3 y 14 % (como muestra la tabla 2.3.1), propagación horizontal 5,4 y 13,8 %, y propagación hacia abajo 6 y 13,4 % (Kirk - Othmer, Enciclopedia de tecnología química, Tomo VII, Página 596).

Propagación de la llama (Deflagración)

Un combustible puede reaccionar con un comburente según tres diversos regímenes: en el primero, de oxidación lenta a la cual la reacción oxidante y el proceso de liberación del calor tienen lugar con bajas velocidades específicas, y a veces sin manifestaciones visibles (llamas); en el segundo, una mezcla combustible / comburente de determinada composición reacciona obteniendo una onda de deflagración, o bien un frente de llama; el tercero son las denominadas ondas de detonación, que pueden obtenerse directamente, o bien, si las condiciones ambientales lo permiten, por transición de una onda precedente de deflagración.

El régimen mas interesante, desde el punto de vista práctico, es sin duda el de las ondas de deflagración, ya que éstas constituyen el sistema más simple y eficiente para convertir la energía química de un combustible en calor sensible.

En una mezcla gaseosa la combustión se propaga desde un punto a toda la masa en un tiempo dado, definiendo precisamente la velocidad de propagación de la llama. Esta velocidad depende principalmente de la composición de la mezcla (porcentaje de metano en aire), como también en menor medida de la conductibilidad térmica y difusión de los gases (difusión de partículas de gas fresco en los gases producto de la combustión y viceversa), tipo de mezclas químicas y velocidad de reacción, velocidad de salida de la mezcla, etc. Existe, sin embargo, para cada proporción metano – aire, una velocidad característica llamada *velocidad normal de combustión* o *velocidad normal de propagación de llama*.

Estas ondas, que se propagan a velocidades bien definidas, están constituidas por una zona de reacción dentro de la cual tienen lugar la transformaciones químicas y la liberación del calor.

La figura 2.3.1 muestra la evolución de la temperatura en un frente de llama generado por la combustión de gases premezclados. El gas que entra en la zona de reacción a la temperatura T_e , se precalienta por conducción a causa del gradiente de temperatura allí existente; cuando ha alcanzado la temperatura de ignición (T_i) inicia la transformación exotérmica, que continúa en la zona de reacción, con un aumento de la temperatura de los gases hasta alcanzar el valor de T_u , característico de los gases quemados.

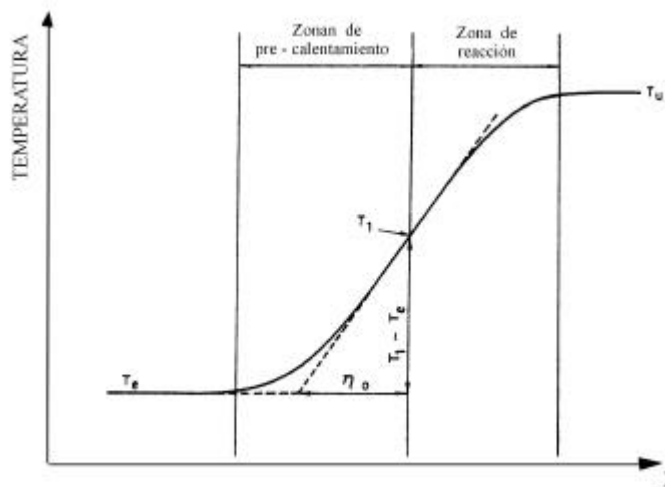


Figura 2.3.1 Perfil de temperatura en un frente de llama (onda de deflagración).
Fuente: Giuliano Salvi, La combustión teoría y aplicaciones, Editorial Dossat S.A.
Segunda Edición, Página 85

La temperatura T_i corresponde al punto de inflexión de la curva; cuanto más rápido son las reacciones, más fina resulta la zona de reacción y más escarpado el gradiente de temperatura en el punto de inflexión. La tangente a éste, prolongada hasta encontrar la línea paralela a las abscisas con ordenada T_e , define un espesor característico de la onda h_0 . Este valor puede obtenerse de la siguiente relación:

$$C_p \cdot r_i \cdot V_f (T_i - T_e) = K(\partial T / \partial X) = K(T_i - T_e) / h_0$$

En donde:

C_p = calor específico de la mezcla gaseosa.

r_i = densidad de la mezcla no quemada.

V_f = velocidad de combustión o propagación de la llama (con dirección normal a la llama).

K = coeficiente de conducción del calor.

De la cual se obtiene:

$$h_o = \frac{K}{C_p r_i V_f}$$

Se observa, que el espesor característico de la onda h_o y por lo tanto el frente de llama, depende de las propiedades térmicas de la mezcla, de su densidad y de su velocidad de llama.

La figura 2.3.2 (velocidad de llama plana en régimen laminar) obtenida experimentalmente, muestra que la mezcla del metano con aire que arden mas rápidamente (mayor velocidad de propagación de llamas), están en el lado de mayor concentración y la velocidad se reduce rápidamente a medida que la composición de la mezcla se aproxima a los límites de inflamabilidad.

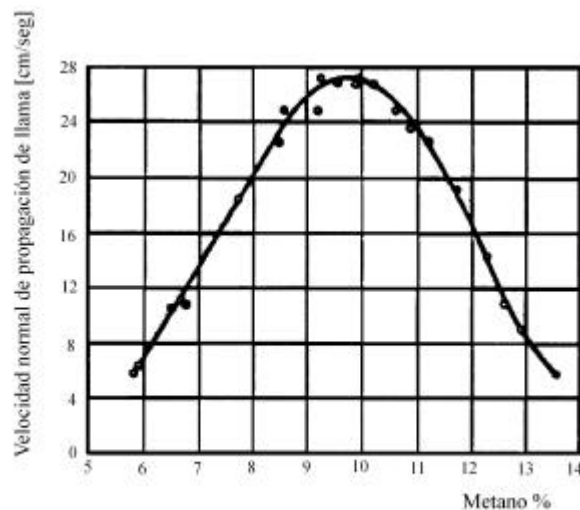


Figura 2.3.2 Velocidad normal de llama en mezcla de metano y aire.
Fuente: Kirk - Othmer, Enciclopedia de tecnología química, Tomo VII, Página 621.

En consecuencia, la velocidad normal de combustión está directamente ligada con los límites de ignición.

Efecto de la turbulencia sobre la llama

De los diversos procesos físicos que intervienen en la combustión, la turbulencia de llama es, sin duda, el más importante. Corresponde a un movimiento desordenado de los fluidos, con formación de un gran número de torbellinos que interfieren unos con otros, dispersos en todo el medio en reacción y de volumen y características cinéticas muy diversas entre sí.

Un movimiento turbulento tiene inicialmente su energía distribuida en torbellinos de grandes dimensiones, que se forman a la salida de los dispositivos que controlan el flujo de los gases; esta energía se degrada con el movimiento de los fluidos, produciendo la formación de una serie de torbellinos de dimensiones cada vez más pequeñas, hasta ser completamente absorbida por fricción viscosa.

La turbulencia puede producir efectos cuantitativos de difusión y de mezcla más marcado que los movimientos moleculares, generando una mezcla más íntima entre el combustible y comburente y un aumento de la velocidad de llama. Los movimientos turbulentos ejercen una acción determinante sobre la combustión, ya que los fluidos en agitación desordenada transportan porciones de llamas, levantando y ondulando la superficie; de este modo la superficie del frente de llama sufre una gran ampliación, y se obtiene un aumento neto de la velocidad de liberación de calor (potencia térmica del quemador) y un avance más rápido de la onda en dirección de la mezcla que no ha reaccionado aún. La turbulencia puede ser producido por la propia mezcla sin reaccionar u ocasionado por la propia llama, debido que la convección tiende a formar remolinos en los gases ascendentes, lo que se comprueba por la deformación de la superficie de la llama.

No siempre una turbulencia aporta ventajas desde el punto de vista práctico, ya que un aumento indiscriminado de la turbulencia puede producir efectos negativos y llevar a disminución del rendimiento térmico o a la extinción de la llama.

Este fenómeno de la extinción de la llama en régimen de gran turbulencia, se debe a que la corriente de gas sufre una variación de velocidad al entrar en la zona de precalentamiento y movimientos vertiginosos (ver figura 2.3.3), por lo que la componente de la velocidad paralela a la onda de combustión C_s crece pasando de la zona de la llama con baja velocidad del gas (V_{g1}) a las de alta velocidad (V_{g2}). Por consiguiente, la llama es sometida a un alargamiento o dilatación (flame stretch) y su superficie se ve obligada a aumentar. La llama, por tanto, se alarga hasta llegar a extinguirse.

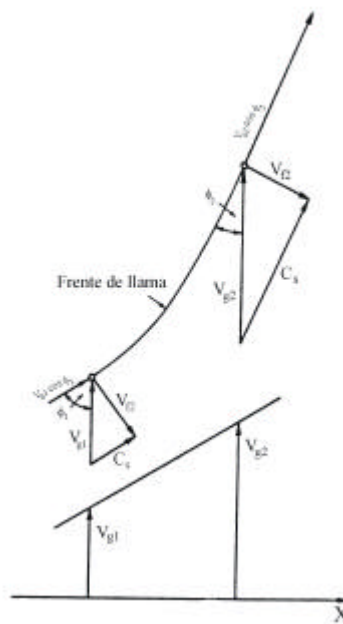


Figura 2.3.2 Variación de las velocidades en régimen turbulento.
Fuente: Giuliano Salvi, La combustión teoría y aplicaciones, Editorial Dossat S.A. Segunda Edición, Página 87.

Una llama se extinguirá por efecto de la turbulencia, cuando el índice adimensional de Karlowitz (NK) supera un límite crítico comprendido entre 1 y 2 establecido experimentalmente. Por lo que una llama no se extinguirá al cumplir:

$$NK = \frac{h_v}{V_f} \frac{U_t}{l} \leq 1$$

En donde:

U_t = intensidad de turbulencia (función de las diversas componentes de la velocidad del gas)

l = parámetro relacionado con la amplitud de la mezcla.

Anteriormente se determino que:

$$h_o = \frac{K}{C_p r_i V_f}$$

Al final queda:

$$NK = \frac{K}{C_p r_i V_f^2} \frac{U_t}{l} \leq 1$$

Resulta, que la intensidad crítica de turbulencia para la extinción de la llama aumenta con el cuadrado de la velocidad de llama en condiciones laminares; esto explica por que las llamas de hidrógeno caracterizadas por una alta velocidad de llama soportan un nivel de turbulencia más alto, que las de metano, con velocidad de llama mas bajo.

Determinación de la velocidad de llama

Como se ha visto hasta el momento, la velocidad de llama es un factor muy importante que regula el proceso de combustión.

Para determinarla, los métodos más comunes son tres: el método de auto ignición en recipiente cerrado, la técnica de la pompa de jabón, y por último y más importante en este caso, debido a que los quemadores y pilotos de los calefones trabajan tipo Bunsen, se determina la velocidad de llama mediante el cono interno de la llama de un mechero Bunsen.

En este sistema, el cálculo de la velocidad de llama se funda, como lo indica la figura 2.3.4, en la determinación de la velocidad de flujo de una mezcla gaseosa inflamable desde el orificio de un mechero Bunsen, en relación con el tamaño del cono interno de la llama. La llama está estacionaria y los gases están en movimiento, lo cual se demuestra que en cualquier punto de la llama, la medición de la velocidad de llama en relación con el medio es igual a la velocidad media (a través de toda la sección del quemador) de los gases multiplicada por el seno del ángulo entre la superficie de llama y el eje del mechero; o bien, que la velocidad es igual al volumen de gas que sale por unidad de tiempo dividido por el área total de la llama.

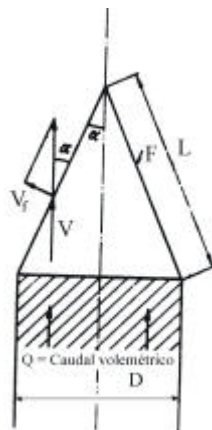


Figura 2.3.4 Determinación de la velocidad de propagación de la llama con el método del cono.

Fente: Giuliano Salvi, La combustión teoría y aplicaciones, Editorial Dossat S.A. Segunda Edición, Página 90.

La reacción de combustión en la región del cono no está todavía terminada, existe rodeando al cono azul una capa luminosa (ver figura 2.3.5), en la cual por medio del aire secundario que se difunde dentro de ella, se completa la combustión de los gases residuales (oxidación del CO).

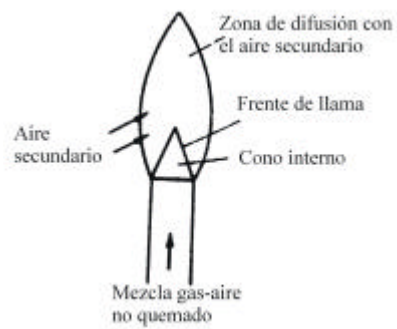


Figura 2.3.5 Zonas de Llama pre – mezclada con mecheros Bunsen.
Fuente: Giuliano Salvi, La combustión teoría y aplicaciones, Editorial Dossat S.A. Segunda Edición, Página 91.

Estabilidad de la llama

Anteriormente se mencionó, que la velocidad de propagación de la llama varía según la proporción de la mezcla (metano / aire), la velocidad de salida de la misma y el grado de mezcla obtenido por la turbulencia.

Por lo tanto, la naturaleza de la llama obtenida dependerá fundamentalmente de estos tres factores, pudiendo ocurrir tres casos:

- 1 La velocidad de salida de la mezcla es tal que el valor de la misma en la corona perimetral del quemador, es mayor que la velocidad de propagación de la llama para dicha mezcla. A consecuencia de esto la misma se desprende del borde del tubo presentándose dos posibilidades:
 - a- Si la mezcla es más rica en gas que la proporción teórica necesaria, la llama trata de estabilizarse en un plano superior, donde se encuentre aumentada la velocidad de propagación por cambio de la proporción con el aire secundario; y por otra parte, se encuentra disminuida la velocidad de salida por aumento de la sección.
 - b- Si la mezcla se encuentra ya en la proporción de máxima velocidad o próxima a ella, la llama se aleja y extingue (Blow – Out).

- 2 La velocidad de salida de la mezcla está de acuerdo con la velocidad de propagación de la llama. En estas condiciones la llama es estable y puede presentar todas las características que varían de acuerdo con la proporción aire – gas. El cono verde luminoso, representativo de la superficie de combustión primaria, disminuye de altura a medida que la mezcla se acerque a la proporción de velocidad de propagación máxima. Por lo contrario la llama se alarga a medida que aumente la riqueza en gas.

- 3 La velocidad de salida es pequeña con respecto a la velocidad de propagación. En este caso puede ocurrir también dos posibilidades:
 - a- El diámetro del tubo (en el caso del piloto) es superior al valor límite (0,315 cm). En este caso la llama retrocede en el interior del tubo encendiéndose el orificio del inyector (retroceso de llama).
 - b- El diámetro es igual o inferior al valor límite, en cuyo caso la llama se mantiene hasta un valor próximo a la anulación del caudal.

Es decir, que la estabilidad de llama se puede controlar modificando alguno de los tres parámetros antes mencionados. La composición de la mezcla (metano / aire), en un quemador Bunsen se controla con la regulación de la entrada de aire primario; en cuanto a la velocidad de salida de la mezcla y su turbulencia pueden modificarse según la geometría del quemador.

La velocidad de combustión de una mezcla inflamable contenida en un tubo, depende del diámetro y la orientación del mismo, propagándose tanto más rápidamente cuanto mayor es el diámetro del tubo.

Como la superficie de la llama es mayor que la sección del tubo, la velocidad de propagación es igual a la velocidad normal de llama multiplicada por la relación entre el área de la llama y la sección del tubo.

En cuanto a la turbulencia se tiene, que aumentando la velocidad del gas en el tubo quemador, el flujo pasa de laminar a turbulento. El tipo de flujo se especifica por el valor obtenido del número de Reynolds (Re):

$$Re = V_g \frac{d}{\nu}$$

En donde:

V_g = velocidad media en toda la superficie de salida de la mezcla.

d = diámetro del tubo.

ν = viscosidad cinemática de la mezcla.

Con Re superior a unos 3000 – 3500, el flujo resulta casi con certeza turbulento. Existe, una zona con número de Reynolds comprendidos entre 2000 y 3000, en el que el flujo puede pertenecer inestablemente a uno u otro tipo de movimiento.

Cuando la turbulencia aumenta fuertemente, las llamas aireadas tienden a separarse de la boca del quemador y a extinguirse.

La figura 2.3.6 muestra que para un diámetro dado del quemador, existe un límite superior de velocidad del gas en el cual se obtiene el desprendimiento de la llama, y uno inferior en el que se manifiesta el retorno de la llama al tubo. Reduciendo progresivamente el diámetro del tubo se alcanza una dimensión límite (d_l), por debajo de la cual ya no es posible mantener la combustión, a causa del efecto de enfriamiento de las paredes (quenching).

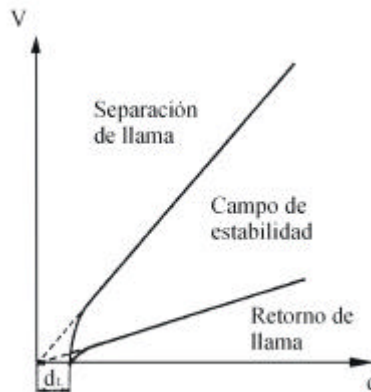


Figura 2.3.6 Campo de estabilidad de una llama en función del diámetro del tubo y la velocidad del gas
Fuente: Giuliano Salvi, La combustión teoría y aplicaciones, Editorial Dossat S.A. Segunda Edición, Página 94.

Para el metano, según el INTI (trabajo del INTI 0622662.6/9/A691, curso para ingenieros, página 16) establece como diámetro límite $d_l = 0,315$ mm.

La longitud del tubo tiene notable influencia sobre el tipo de flujo, en el sentido que existe un valor mínimo de longitud que es necesario superar si se quiere un flujo laminar neto; esto depende del número de Reynolds y del diámetro del tubo en la siguiente relación:

$$L_{min} = 0,03 Re d$$

Estableciendo un Re por ejemplo de 200 y un diámetro de 10 mm, se requerirá una longitud mínima del tubo quemador de 60 mm para obtener un flujo completamente laminar.

Los quemadores Bunsen normales dan flujos y llamas de tipo mixto, en cuanto su longitud es inadecuada para la velocidad del gas empleada.

3 Tecnología de la combustión y desarrollo del piloto analizador

3.1 Comportamiento de un quemador según su geometría

Es sabido que en el proceso de la combustión el carbono y el hidrógeno del combustible se transforman, al reaccionar con el oxígeno, en CO_2 y H_2O (Combustión completa); pero en la práctica se encuentra que la combustión se realiza en forma incompleta, generando en los gases de salida una cierta cantidad de CO , CH_4 , etc.

También se menciona anteriormente que la geometría del mezclador tiene una incidencia significativa, tanto en la estabilidad de llama, como así, en las emisiones de productos indeseables del proceso de combustión.

Todo quemador (en condiciones óptimas de funcionamiento) además de garantizar la estabilidad de llama, debe garantizar la seguridad del usuario evitando fugas de metano al ambiente en su producto y un porcentaje de CO en los productos de la combustión inferior a 0,1 % (Según normas para calentadores de agua para uso doméstico de ENARGAS). El funcionamiento óptimo de un quemador atmosférico se caracteriza por las siguientes condiciones:

- o Máxima eficiencia.
- o Combustión higiénica. La producción de Monóxido de carbono durante la combustión debe ser nula o estar dentro del rango establecido por las normas (0,1 %)
- o Emisiones de NO_x dentro del rango establecido por las normas. (en la Argentina las normas no establecen límites de NO_x para quemadores de tipo doméstico)
- o Estabilidad de llama.
- o Llama sin puntas amarillas y sin producción de hollín.
- o Operación silenciosa.
- o Ignición correcta en las boquillas.

Para obtener un funcionamiento óptimo de un quemador, debe estudiarse cómo intervienen los parámetros geométrico de un quemador en las emisiones de CO y CH_4 . Desde el punto de vista teórico y práctico, un piloto es un quemador de pequeñas dimensiones de baja potencia térmica, el cual sigue los mismos principios de variabilidad que los quemadores principales.

Un estudio realizado por el departamento de investigaciones de la universidad de Antioquia en Colombia sobre los parámetros geométricos de un quemador atmosférico dio los siguientes resultados:

Se utilizó un quemador atmosférico básico de premezcla constituido por:

- Inyector: Desde donde se descarga el gas combustible. El gas al expandirse actúa como fluido inductor, para arrastrar al aire primario de la atmósfera.
- Mezclador: Donde el gas y el aire arrastrado se mezclan, buscando siempre alivio de presiones y buen contacto entre aire y gas.
- Cabeza: Donde se efectúa la combustión de la mezcla aire - combustible

La geometría del mezclador utilizado se muestra en la figura 3.1.1 y la tabla 3.1.1 describe las dimensiones utilizadas para cada ensayo.

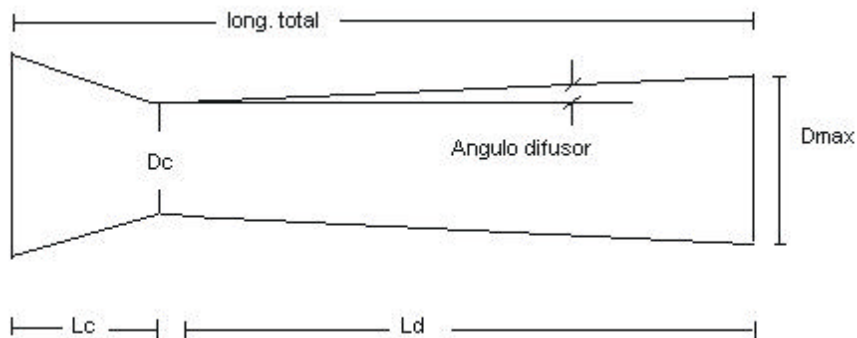


Figura 3.1.1 geometría del mezclador utilizado en los ensayos.

Fuente: Universidad de Antioquia, Departamento de investigación y desarrollo, Colombia.

Parámetros Geométricos (mm)	A	B	C
Dc	11	12.5	12.5
Lc	28	31	31
Ld	61	70	-
Angulo difusor	3.61°	3.58°	0°
Long. total	94	106	143.5
D. Salida máx	18.7	21.25	12.5

Tabla 3.1.1 Dimensiones de los mezcladores.

Los ensayos se realizaron con una presión de suministro de gas de 200 mmH₂O, y una concentración en metano de mas de 97 %. Los diámetros de la cabeza de los inyectores utilizados son de 1,0 , 1,1 y 1,2 mm.

También se utilizaron dos cabezas cilíndricas, una continua al mezclador C1 y la otra ligeramente mas pequeño C2, de los cuales se obtuvo lo siguiente:

Los mezcladores tipo C (mezclador cilíndrico) sin tramo convergente-divergente contribuyen de manera significativa a la formación de CO (Ver gráfico 3.1.2 y 3.1.3), en particular tuvieron niveles de emisiones superiores al límite crítico (0,1%). Esto puede deberse a la falta de un mezclado homogéneo del aire primario y el gas, debido a la ausencia de un tramo divergente que contribuya al contacto íntimo entre el oxígeno y las moléculas de combustible.

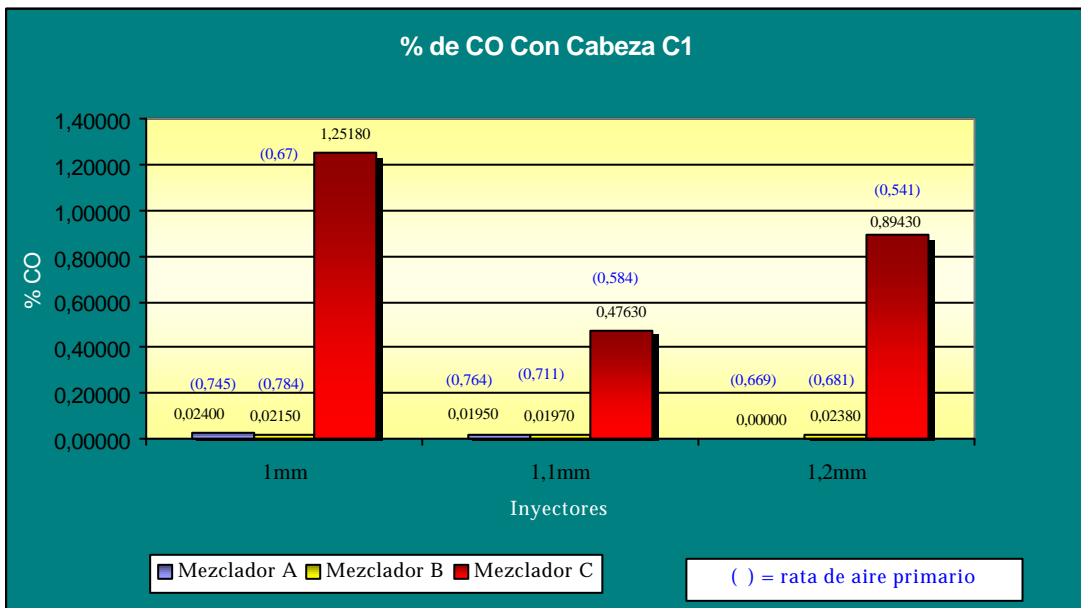


Gráfico 3.1.2 Porcentaje de CO obtenido en los gases de combustión con cabeza C1.

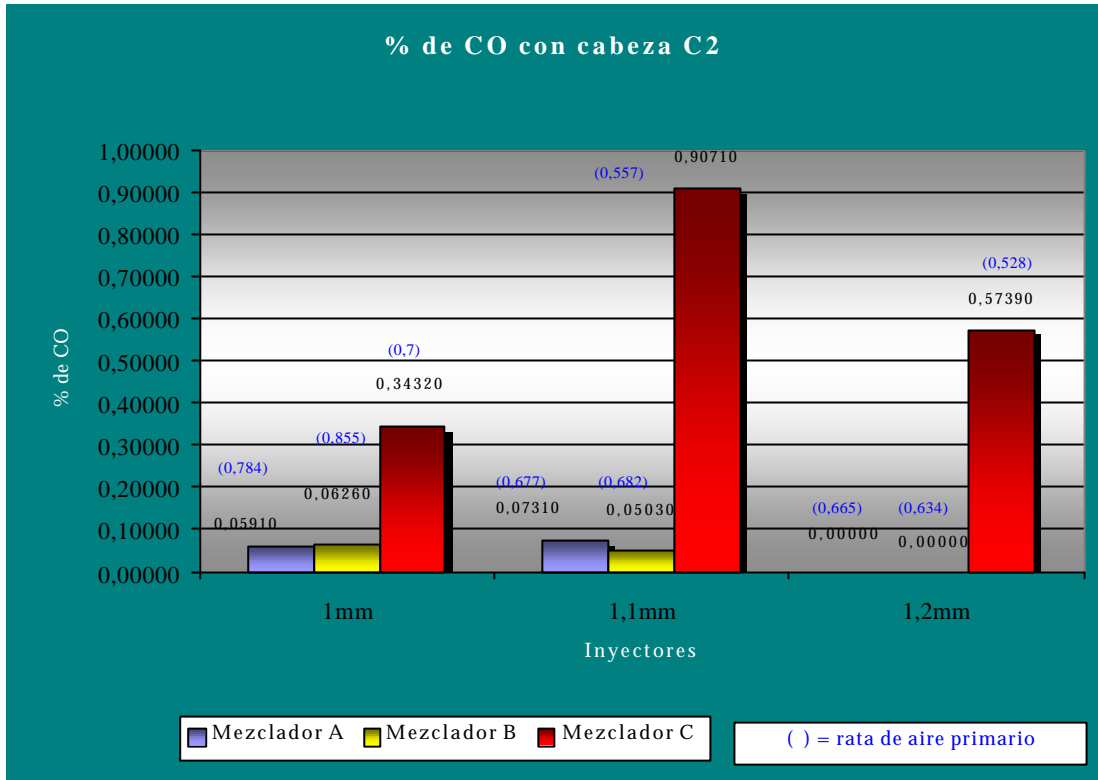


Gráfico 3.1.3 Porcentaje de CO obtenido en los gases de combustión con cabeza C2.

En cuanto al metano, se observa nuevamente que en los mezcladores cilíndricos las emisiones de CH₄ se elevan con respecto a las emisiones en los mezcladores con tramo convergente – divergente. (Ver gráfico 3.1.4 y 3.1.5).

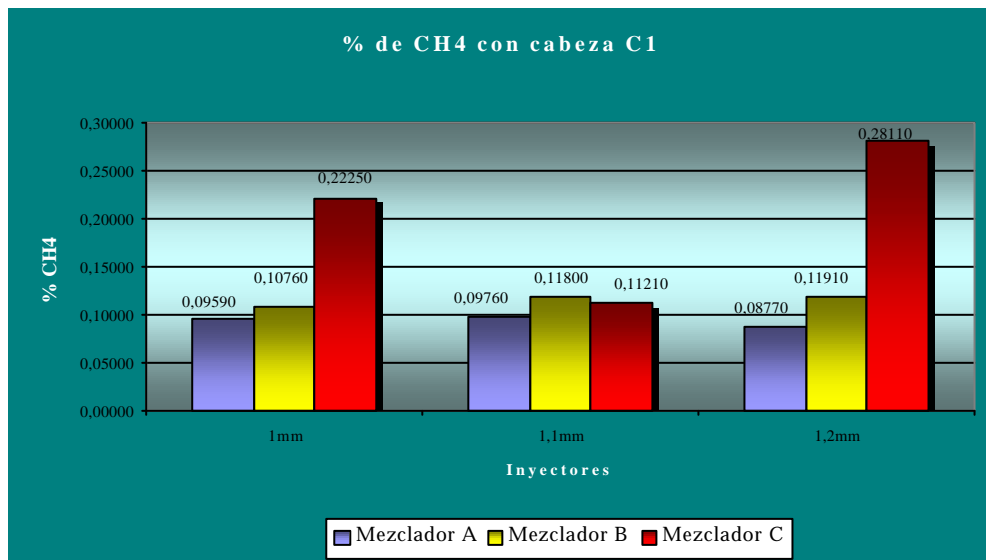


Gráfico 3.1.4 Porcentaje de CH₄ obtenido en los gases de combustión con cabeza C1.

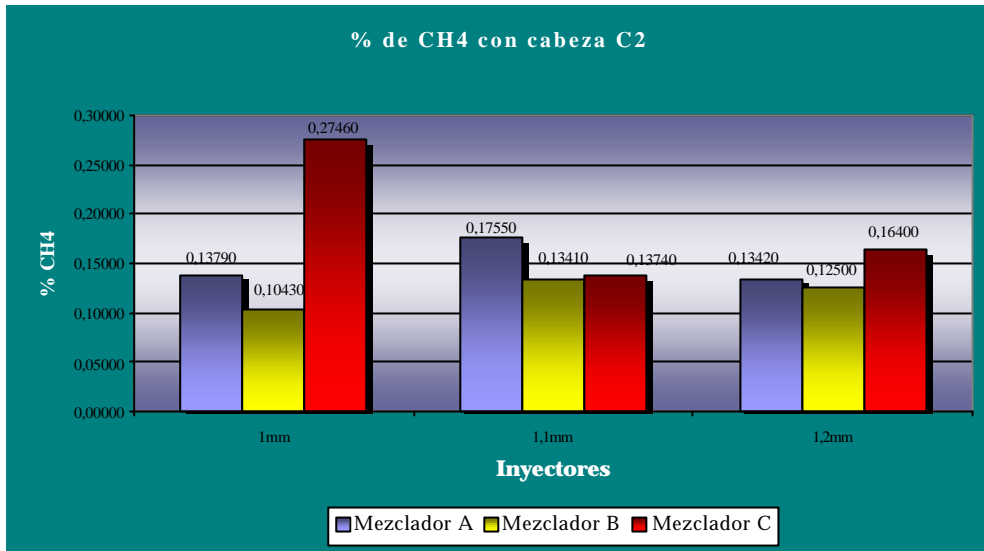


Gráfico 3.1.5 Porcentaje de CH4 obtenido en los gases de combustión con cabeza C2.

De estos resultados también se aprecia que la condición de una rata de aireación alta (mayor de 0.6), no es suficiente para la no formación de CO cuando se tiene potencias mayores o iguales a 1,65 KW. Así, por ejemplo, para el inyector de 1.0 mm y el mezclador sin tramo divergente – convergente (C, C1) se tiene una rata de aireación de 0.67 y un %CO de 1.25%, mientras que con el inyector de 1.1 mm y un mezclador con tramo divergente – convergente (A, C2), la rata de aireación es prácticamente 0.68 y el %CO es 0.073.

Luego realizaron unas pruebas adicionales para determinar las emisiones de CO y CH₄, trabajando con presiones de suministro de 200, 400, 600 y 800 mmH₂O y con los 3 inyectores, comprobaron que al aumentar la presión se producía una importante reducción en las emisiones de CH₄, por ejemplo al aumentar la presión de 400 a 800 mmH₂O, las emisiones de metano disminuyeron un 100%.

Asimismo, los resultados observados muestran que estas emisiones no experimentan cambios significativos con el incremento de la rata de aireación primaria. (Ver figura 3.1.6)

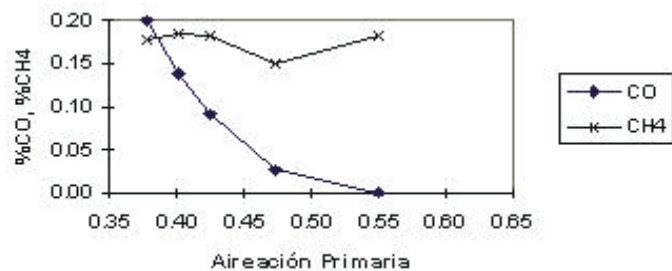


Figura 3.1.6. Variación de %CO y %CH₄ con la aireación primaria. Inyector de 1.0 mm, Ps: 200 mmH₂O.

Es importante tener en cuenta que los materiales utilizados para fabricar los quemadores, también son de importancia ya que afectan a los parámetros antes mencionados. Los materiales más utilizados para éste fin son en algunos casos la fundición, a veces en la sección de salida se utiliza latón; también se utiliza con resultados menos satisfactorios aleaciones de aluminio (tipo Piral), y el mas utilizado en calefones es el acero inoxidable.

Conociendo el material y los parámetros geométricos para una correcta combustión y perfecta estabilidad de llama, es posible dimensionar un quemador, o quemador piloto, tal que cumpla perfectamente con las grandes exigencias a la que son sometidos en los calentadores instantáneos de agua, ya que éstos tienen un gran consumo de calorías comparadas con otros equipos utilizados para el mismo fin como ser los termostatos.

3.2 Construcción de un piloto analizador de ambiente

Se entiende por piloto control de ambiente un dispositivo de seguridad que actúa produciendo el corte del pasaje de gas al artefacto ante el enrarecimiento de la atmósfera circulante.

Su principio de funcionamiento es el siguiente:

Cuando un equipo de combustión y por lo tanto un calefón se encuentra en funcionamiento, los gases de combustión son eliminados por la chimenea o tiraje. Cuando se produce algún desperfecto o se bloquea el conducto de salida de los gases y el artefacto se encuentra en un ambiente cerrado (caso usual en invierno), se produce un aumento en el ambiente de CO , CO_2 y H_2O y otros productos de la combustión; así mismo se produce una disminución del porcentaje de O_2 consumido por el quemador.

Al disminuir el oxígeno se produce un aumento de metano en la mezcla (metano – aire) inyectada al quemador y por consecuencia disminuye la velocidad de combustión o propagación de llama (ver figura 2.3.2). Dado que el gas natural es inyectado por la red, no disminuye su velocidad de salida y por lo tanto se tiene una situación en la que la velocidad de salida de la mezcla metano – aire es mayor que la velocidad de combustión para esa mezcla, y por consiguiente se produce un despegue de la llama del borde del quemador. La llama al elevarse sobrepasa la altura en donde se encuentra ubicada la punta de la termocupla, consiguiéndose el enfriamiento de la misma y por consiguiente una disminución del potencial eléctrico generado, y por efecto del resorte en la unidad magnética cierra el paso general de gas y el equipo se apaga.

Por lo tanto el piloto debe estar dimensionado para producir ese efecto cuando el porcentaje de oxígeno en el ambiente llegue a un cierto valor, sin embargo las especificaciones técnicas para dispositivo sensores de atmósfera ET-ENRG-GD N° 9 del ENARGAS (ver anexo E) indican que el artefacto debe apagarse cuando el nivel de CO en un ambiente de 17 m^3 llegue como máximo a 100 ppm.

Para que se logre el efecto buscado, estos elementos deben diseñarse de modo que se evite que el usuario pueda manipular las partes esenciales o anular el elemento y por lo tanto poner en riesgo su seguridad.

El piloto no deja de ser un mechero Bunsen por lo que está constituido por:

- ◆ *Cabeza*: esta puede ser mono llama, con dos llama o tres dependiendo del modelo de calefón o equipo a ser instalado.
- ◆ *Mezclador*: constituido por un tubo de largo y diámetro variable dependiendo del modelo del piloto.
- ◆ *Cuerpo*: tuerca con rosca externa en donde se encuentra el agujero para la toma de aire primario. Dicha tuerca se encuentra soldada a un soporte para su colocación en el equipo.
- ◆ *Inyector*: con diámetro de agujero para gas natural desde 0,3 mm hasta 0,4 mm dependiendo del modelo y diámetro del agujero de entrada del aire primario.
- ◆ *Virola*: elemento que asegura un perfecto sellado de la conexión del gas y evita que se produzcan fugas de metano por mal cierre.
- ◆ *Tuerca de cierre*: es la encargada de cerrar la conexión de gas al piloto.

Para la construcción de un piloto analizador se toma un piloto normal para calefón de la firma Rheem S.A. y se trata de transformarlo en analizador sin cambiar las partes y dimensiones del mismo. Este requerimiento se busca para poder utilizar en producción las mismas matrices y dispositivos ya existentes.

Para poder producir una llama estable o no, debe modificarse la composición de la mezcla (metano / aire) y/o la velocidad de salida de la mezcla. Al analizar un piloto normal, se encuentra que la velocidad de salida de la mezcla es de aproximadamente 48 cm/seg y la velocidad máxima de combustión para una mezcla estequiométrica es de aproximadamente 40 cm/seg, lo que permite observar que la llama es muy estable en condiciones normales de funcionamiento. Cuando el ambiente se encuentra cerrado, se requiere que el porcentaje de oxígeno en el ambiente sea muy bajo para que la diferencia de velocidad sea tal que produzca el despegue de la llama; la rata de aireación primaria es de aproximadamente 60 – 70 % y el resto del aire lo absorbe del ambiente como aire secundario.

Cuando se llega a la situación de composición tal que el piloto deba apagarse, se encuentra que todavía la rata de aireación primaria es alta y la velocidad de salida es baja.

Para lograr el efecto buscado se puede modificar algún parámetro de la geometría del piloto, como ser el largo y diámetro del mezclador con el objetivo de modificar la turbulencia de la mezcla y velocidad de salida de la misma, o también se puede modificar el diámetro de salida del inyector produciendo una variación en la mezcla primaria y en la velocidad de salida; estos parámetros no son los mas adecuados para modificar ya que como se menciono anteriormente se cuenta con todas las matrices ya preparadas y en producción.

Los parámetros que se pueden modificar no son muchos, el más directo es el diámetro del agujero de entrada del aire primario ya que éste se realiza con una agujereadora y el único cambio que exige es el cambio del diámetro de la mecha; otro factor a modificar, es la obstrucción en un punto del diámetro del caño mezclador con la inserción de una nueva pieza (ver figura 3.2.1).

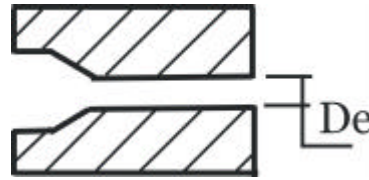


Figura 3.2.1 Pieza de obstrucción en tubo mezclador.

Determinación de los parámetros.

Dado a las pequeñas magnitudes a medir en estos elementos, como ser velocidad de salida del gas, caudal utilizado, rata de aireación, etc, con frecuencia se dificulta la utilización de los instrumentos comúnmente utilizados en laboratorios y se requieren instrumentos muy sensibles y precisos con costos muy altos de adquisición.

Debido a estos inconvenientes y a la complejidad de los parámetros relacionados con el principio de estabilidad de llama y combustión, será la experimentación, guiada por los conocimientos teóricos, los que encuadrarán satisfactoriamente las características y ajustes del producto a realizar.

La experimentación se realiza según la especificación técnica para dispositivos sensores de atmósfera ET-ENRG-GD Nº 9 (ver anexo E), para lo cual se construye un cuarto de 2,5 m de altura, 3 m de largo y 2,40 m de ancho, formando un volumen de 18 m³.

Para comprobar la estanqueidad del cuarto se coloca el calefón en funcionamiento, una vez en régimen se cierra la puerta, se bloquea la salida de la chimenea y comienza a monitorear el contenido de CO₂ hasta que alcance un valor de 4%. Una vez alcanzado, se cierra la llave de gas que alimenta al equipo y al cabo de dos horas se mide el contenido de CO₂ y observa que ha disminuido 0,07 %. A partir de ese momento se deja el cuarto óptimo para realizar los ensayos ya que la norma establece una disminución máxima de 0,1%.

El método de ensayo consiste en colocar el piloto analizador en un calefón, una regla metálica cerca del piloto con el cero en el borde del mismo y encender el piloto y quemador principal, una vez en régimen se cierra la puerta y se bloquea la salida de los gases de combustión. Cuando la composición del CO alcanza el valor de 100 ppm (establecido por la norma del anexo E), se registra la altura de inicio de la llama y la tensión originada por la termocupla. Este procedimiento se repite por cada variante de agujero de entrada del aire primario y por cada pieza de obstrucción creada.

La tabla 3.2.1 indica un resumen de los valores de ensayo y los resultados obtenidos. Es lógico de esperar que a medida que aumente el diámetro del agujero de entrada del aire primario la llama no se eleve lo esperado, lo que indica que hay que disminuir la sección hasta encontrar la condición deseada pero que a condiciones normales de funcionamiento la llama sea estable.

De la tabla también se observa, que si el diámetro *De* del obturador disminuye más de 2 mm la llama en condiciones normales se comporta como un soplete, levantándose hasta extinguirse, por el contrario si se sobrepasa los 3,5 mm la llama no sufre modificación por la colocación de este obturador.

Ensayo Nro.	Diámetro del obturador. De (mm)	Diámetro del agujero del aire primario d (mm)	Altura de la llama Z (mm)	Estado de la llama
1	1,00	2,50	—————	No auto propaga ^{a, cn}
2	1,50	2,50	—————	No auto propaga ^{a, cn}
3	2,25	2,50	6	Estable en plano Z ^{cn}
4	2,90	2,50	15	Estable en plano Z ^{cco}
5	SO	3,00	0	Estable ^{cco}
6	1,00	3,00	—————	No auto propaga ^a
7	1,50	3,00	10	Estable en plano Z ^{cn}
8	2,00	3,00	5	Estable en plano Z ^{cco}
9	2,90	3,00	———	Estable ^{cco}

Tabla 3.2.1 Ensayos realizados para determinar la geometría del piloto analizador.

Nota: Cn = estado de la llama indicado en condiciones normales (cuarto abierto).

CCO = estado de la llama indicado con cuarto cerrado y a 100 ppm de CO.

a = llama muy inestable, requiere de un foco de calor para mantener la combustión.

SO = sin obturador, diámetro igual al tubo mezclador (5 mm).

El ensayo N° 4 muestra un llama estable en condiciones normales y un elevamiento de aproximadamente 15 mm en condiciones de ensayo (100 ppm de CO); la termocupla se encuentra ubicada aproximadamente a 12 mm del borde del piloto, lo que supone se producirá el enfriamiento de la misma y por lo tanto el calefón se apagará.

Al Conectar el piloto N° 4 a la válvula agua – gas y repetir el ensayo, se encuentra que el equipo se apaga cuando en el ambiente se encuentra 72 ppm de CO, dado que las especificaciones técnicas indican no superar los 100 ppm, se construye el piloto analizador con un diámetro del agujero del aire primario de 2,5 mm y un obturador con diámetro interno (De) de 2,90 mm.

Probablemente el piloto analizador que funciona en un calefón tendrá la bondad de poder utilizarse en cualquier otro equipo domestico de combustión, la condición que debe cumplirse es que su posición sea siempre vertical, ya que si se acuesta o se inclina puede variar el rango de operación.

Si en cambio, se coloca un piloto analizador calculado para que funcione en otro equipo (ej: termotanque) y luego se lo coloca a un calefón, lo mas probable que el piloto se apague al encenderse el quemador principal. Esto se debe a que el calefón es el equipo doméstico de mayor potencial térmico; al comparar el valor de un termotanque de 150 L con un consumo de 6000 kcal/h con un calefón de 14 L y un consumo de aproximadamente 20000 kcal/h, se observa la marcada diferencia y se comprende que al encenderse esté último, se genera un consumo y movimiento brusco del aire circulante que produce el apagado del sensible piloto analizador.

Al transformar un piloto normal en piloto analizador se debe cambiar su configuración, por lo que en condiciones normales de operación el piloto analizador responderá en estado estable pero con cierta diferencia ha que si fuese piloto normal.

4 Análisis del mercado y de los contaminantes

4.1 Análisis del mercado

Desde el punto de vista de la ingeniería industrial, no solo es importante conocer los aspectos científicos y técnicos para la proyección, dimensión y construcción del producto, sino también es imprescindible conocer el mercado existente y potencial. Esto es así, debido a que por más maravilloso o extraordinario que sea un producto, si no existe una demanda satisfactoria, el producto no se venderá o la cantidad del mismo no justifica el esfuerzo y capital de inversión para su desarrollo. Desde el punto de vista de las

ofertas, también es imprescindible conocer a los competidores actuales y potenciales y las dificultades para penetrar en el mercado.

Análisis de la demanda

Los pilotos y los pilotos analizadores para calefón, como ya es sabido, no son un producto final, sino que deben ser instalados en el equipo, por lo que su demanda es clasificada como bienes intermediarios o industriales. Entendiéndose por esta clasificación a todo elemento o producto que requieren algún procesamiento o armado para ser bienes de consumo final.

La resolución N° 1188 del ENARGAS (ver anexo C), resuelve que los fabricantes e importadores de artefactos de cámara abierta, a partir del 1° de marzo del 2000 deberán producir y comercializar estos artefactos con un quemador piloto analizador de atmósfera, un dispositivo censor de temperatura de los gases de combustión o ambos. Debido a esto, la cámara Argentina de fabricación de artefactos a gas (CAFAGAS) por motivos expuesto en el Anexo D solicitó una prórroga para la aplicación de dicha resolución, la cual fue aceptada y prorrogada hasta el 1° de julio del 2002 por la resolución del ENARGAS N° 2375/01 (ver anexo D).

La demanda del piloto analizador de ambiente para calefón a partir del 1° de julio del 2002, serán todas las empresas que fabrican e importan dicho producto.

Dada la gran recesión y tipo de cambió en que se encuentra la Argentina al día de la fecha, resulta casi imposible analizar el mercado de calefones y sobre todo de las importaciones. De todas formas se puede analizar el panorama del año 2000-2001 para analizar el mercado en condiciones "normales" de consumo y poder proyectar la demanda.

En la Argentina se encuentran alrededor de unas 15 empresas importantes fabricantes de artefactos domésticos, que producen y comercializan calefones. De estas 15 empresas, solo Orbis realizó exportaciones considerables a Brazil en ese período a razón de 10.000 equipos anuales.

Las empresas más importantes que importan calefones a la Argentina son dos, la primera y líder en Latinoamérica es CEM S.A. de procedencia chilena con una importación de 1.000 equipos mensuales, la segunda es Bosch S.A. que no ha logrado todavía una penetración importante en el mercado.

La tabla 4.1.1 señala las empresas productoras y comercializadoras de calefones en Argentina y sus ventas anuales.

Empresas	Venta anual
Orbis - Metrig S.A. - Volcan.	156000
Universal	84000
Eskabe S.A. - Oro Azul	45600
Longvie S.A.	20400
Del Re Hnos. S.R.L.	16800
Emege S.A.	14400
Talsar S.R.L. - Señorial.	4800
Fiamma S.A. - Glama	4800
Total Anual	346800

Tabla 4.1.1 Fabricantes de calefones y ventas anuales.

Fuente: Luciana Anim, Orbis S.A., área marketing; y Arquitecta Lorena Martínez Zubeldía, Emmege S.A., área construcción.

De la tabla 4.1.1 se percata que existe un mercado total de aproximadamente unos 30.000 calefones mensuales y de los cuales Orbis, Universal y Eskabe abastecen prácticamente el 83 % del mismo (ver gráfico 4.1.2).

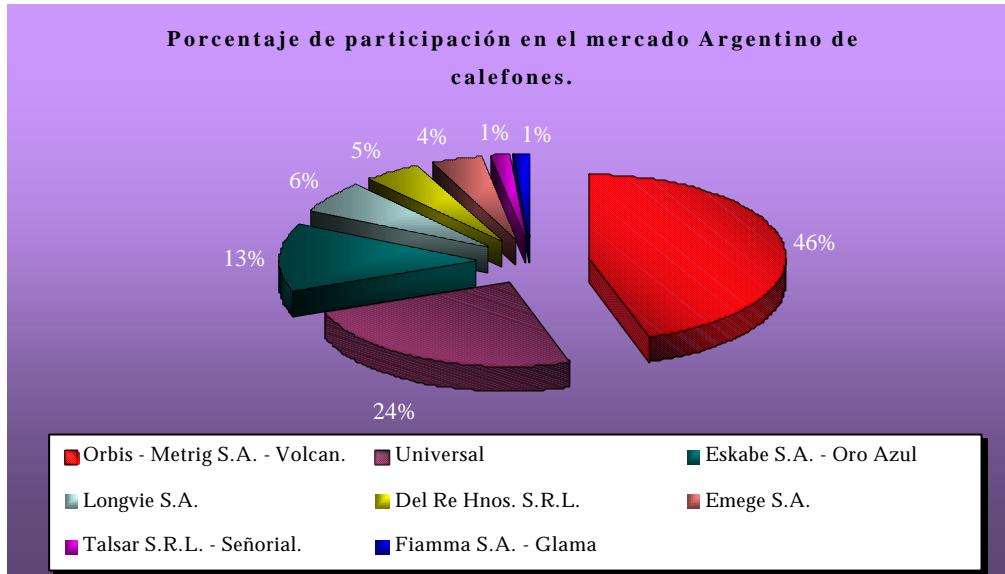


Gráfico 4.1.2 Porcentaje del mercado de las principales empresas productoras en Argentina.

Análisis de la oferta

Por cada calefón se requiere un piloto analizador, por lo que se deduce que el mercado para la fabricación de pilotos es de aproximadamente 30.000 mensuales.

En la Argentina se encuentran solamente 3 fabricantes de pilotos comunes, Eitar S.A., Del Re Hnos. S.R.L. y Compañía Argentina de Control S.R.L., los cuales pueden desarrollar y comercializar los pilotos analizadores.

Las 3 empresas nacionales compiten con 4 empresas extranjeras que exportan a la Argentina dicho producto, Polydoro, Sit, OP Control y Copresi de los cuales los dos primeros importan todo tipo de pilotos, en cambio los dos últimos solo importan pilotos analizadores.

La tabla 4.1.2 indica la producción anual de pilotos comunes y analizadores, y el gráfico 4.1.3 muestra el porcentaje del mercado de las empresas nacionales y extranjeras que producen y comercializan pilotos para calefón.

Empresa	Origen	Producción anual
Del Re Hnos. S.R.L.	Nacional	117.600
Eitar S.A.	Nacional	100.800
Polydoro	Italiana	40.320
Compañía Argentina de Control S.R.L.	Nacional	26.880
Otros		16.800
Sit S.A.	Italiana	16.800
OP Control S.A.	Italiana	8.400
Copresi S.A.	Española	8.400
Total		336.000

Tabla 4.1.2 Fabricantes de pilotos y ventas anuales.
Fuente. Buono Juan Carlos, Del Re Hnos. S.R.L., área ventas.

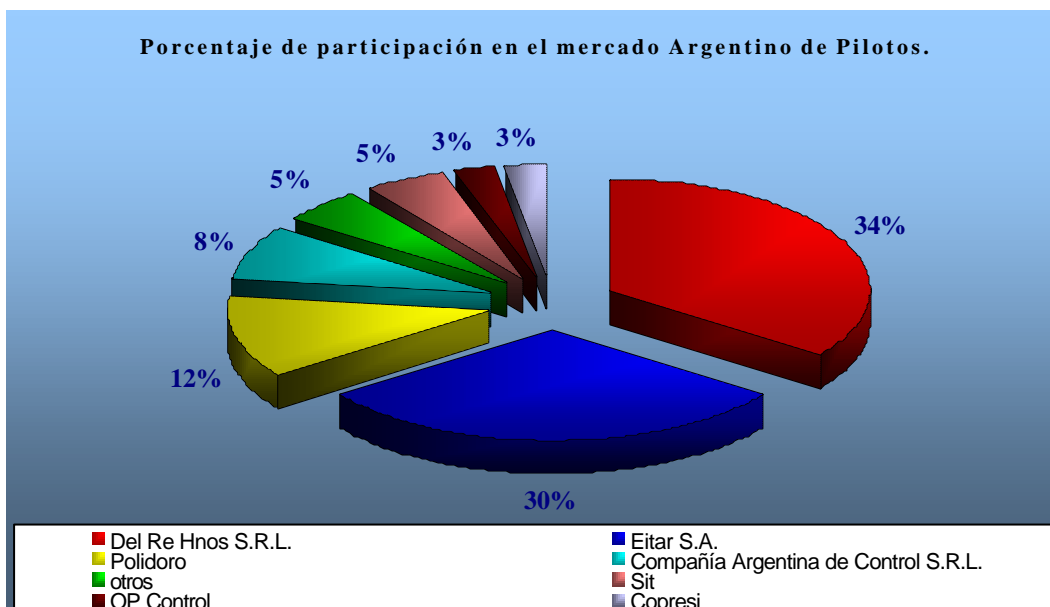


Gráfico 4.1.3 Porcentaje del mercado de las principales empresas nacionales y extranjeras.

La fabricación de 30.000 pilotos analizadores mensuales es el mercado sólo para su utilización en calefones. Como se mencionó en el capítulo 3.1, los pilotos analizadores para calefón pueden utilizarse en otros artefactos domésticos alimentados a gas, lo que genera una mayor demanda de éstos.

Para toda empresa fabricante de pilotos, dados los valores del mercado, es rentable producir y comercializar los nuevos pilotos analizadores de ambiente.

4.2 Efectos de los gases de la combustión sobre la salud

En época invernal, dado al incremento en el uso de artefactos alimentados a gas, y fundamentalmente debido a la escasa ventilación con que cuentan las viviendas en esos días, se produce un marcado ascenso en la cantidad de casos de personas que resultan intoxicadas con monóxido de carbono. Según voceros del Ministerio de Salud, el monóxido de carbono causa medio centenar de muertes en la temporada invernal sólo en Capital Federal, elevándose esa cifra a casi 200 en todo el país.

El monóxido de carbono, asesino imperceptible, es un gas que no puede ser advertido fácilmente por el ser humano, es invisible e inodoro, el hombre sólo puede notar su presencia a través de los síntomas nocivos que desencadenan en su organismo, o mediante la utilización de instrumentales adecuados (detectores de monóxido de carbono).

Como se dijo anteriormente, el SO_2 , CO_2 , ON_x , CH_4 , C_{libre} y CO son generados por la combustión incompleta de distintos artefactos de combustión que son de uso común, como por ejemplo, calefactores, estufas, termotanques, calefones, etc, entre los cuales, el calefón merece un tratamiento especial; efectivamente, éste es un asiduo protagonista en la mayor parte de las muertes causadas por el gas tóxico aludido, debido ello sin lugar a dudas a su gran capacidad calorífica, lo cual origina una profusa liberación de gases de combustión, entre los que se halla el monóxido de carbono.

La comparación entre las capacidades caloríficas de los calefones y termotanques grafican aún más lo dicho precedentemente, es así que los primeros pueden contar con un potencial calorífico de entre 12.000 y 25.000 kcal/h, en tanto que el más poderoso de los calentadores con almacenamiento, arriba como máximo a 9.000 kcal/h.

Esta característica técnica y el difundido uso que tiene el calefón, lo convierten en cómplice de la gran mayoría de los accidentes fatales que son causados por el dañoso monóxido de carbono. Resulta importante destacar que todos aquellos artefactos que funcionan a gas natural o envasado son normalmente productores de gases derivados, y que la seguridad en su utilización no la brindan generalmente su mayor o menor antigüedad, calidad o marca, sino fundamentalmente la correcta instalación del sistema, especialmente, lo que hace a la evacuación de gases.

Los efectos que los gases de combustión ocasionan a la salud de las personas son:

Monóxido de carbono (CO):

Los efectos causados por exposición al CO dependen de la capacidad de la sangre para transportar oxígeno (O₂). Las moléculas de hemoglobina contenidas en los glóbulos rojos de la sangre transportan oxígeno para ser cambiado por dióxido de carbono en los vasos capilares que unen las arterias y las venas. El CO es relativamente insoluble y llega fácilmente al fondo de los pulmones hasta los alvéolos junto con el O₂. El CO se difunde a través de las paredes alveolares y compite con el oxígeno por uno de los 4 átomos de hierro de la molécula de hemoglobina. La afinidad del átomo de hierro por el CO es aproximadamente 210 veces mayor que por el oxígeno lo que confiere al CO una considerable ventaja en esta competición por las moléculas de hemoglobina. Cuando una molécula de hemoglobina adquiere una molécula de CO, se convierte en carboxihemoglobina (abreviado COHb). La presencia de carboxihemoglobina disminuye la capacidad total de la sangre de llevar oxígeno a las células, las moléculas de hemoglobina contenidas en los glóbulos rojos de la sangre transportan oxígeno para ser canjeado por dióxido de carbono (CO₂) en los vasos capilares. El CO llega fácilmente hasta los alvéolos y compite con el oxígeno. La afinidad de la hemoglobina por el CO es entre 210 y 220 veces mayor que la que tiene por el O₂, esto significa que si se tiene sangre humana en una atmósfera en la cual hay 210 moléculas de O₂ por cada una de CO, una vez alcanzado el equilibrio, la mitad de la hemoglobina total se encontrará como carboxihemoglobina. La formación de carboxihemoglobina (COHb) no tiene la misma velocidad durante el proceso de exposición, el 60 % se forma durante las primeras 2 horas, el 80 % durante las primeras 4 horas, y el 20 % restante, durante las 8 horas siguientes. Una vez alcanzado el equilibrio de desplazamiento, no se fija más CO a la hemoglobina aunque continúe la exposición al aire contaminado, pero la falta de oxigenación de los tejidos produce daños irreversibles. La formación de COHb es un proceso reversible y al cesar la exposición, se libera la hemoglobina. En individuos sanos, 4 horas luego de una exposición, la sangre queda libre de la mitad del CO. La tabla 4.2.1 indica la relación entre la concentración de CO en el aire y los efectos en la salud.

Condiciones ambientales	Efectos
9 ppm con 8 hs.	Norma sobre la calidad del aire ambiental de exposición.
9 a 25 ppm	Náuseas, jaqueca, trastornos del sueño, fatiga disminución de la destreza manual, amnesia y cambio brusco de carácter.
25 a 50 ppm	Vómitos, crisis de nervios y disminución de la capacidad intelectual.
50 ppm con 50 minutos de exposición	Cambios en el umbral de la luminosidad relativa de la agudeza visual.
50 ppm con exposición de 8 a 12 hs. Para los no fumadores	Impedimentos en el funcionamiento de las pruebas psicomotoras.
50 ppm con 6 semanas de exposición.	Cambios estructurales en el corazón y cerebro de animales.

Tabla 4.2.1 Daños sobre la salud a las distintas exposiciones de CO en el aire.

Fuente: J. Morettón, *Contaminación del aire en Argentina*, Ediciones Universo, Buenos Aires, 2/1996, p. 25 y Sibila Camps, *Un gas altamente tóxico*, Clarín, Buenos Aires, 21/11/97, p. 43.

El nivel normal de COHb es de 1,2 % a 1,5 %, pero puede llegar del 4 al 7 % en las personas que fuman un paquete de cigarrillos al día. Cuando el nivel de COHb llega a alrededor del 5 % comienza a inducir efectos nocivos para la salud. Algunos estudios han demostrado que comienza a afectarse la capacidad de raciocinio a niveles de COHb comprendidos entre 3,2 % y 4,2 %. La exposición de personas embarazadas al CO se ha vinculado a un bajo peso al nacer de sus hijos y a un retraso en el desarrollo posnatal. Además, la mayor concentración de CO esta vinculado a una menor productividad de los trabajadores y a un malestar general. En 8 hs. o más horas de exposición de 10 a 15 ppm un adulto llega a concentraciones de COHb de 2,5 %, aproximadamente y los valores de COHb en sangre se ven notablemente incrementados en fumadores donde se multiplican por 3 ó 4.

Una exposición a concentraciones de 45 mg/m^3 de CO durante más de 2 horas afecta la capacidad de raciocinio de una persona. Entre 2 y 4 horas de exposición a 240 mg/m^3 se eleva el nivel de COHb en la sangre entre 10 % y 30 %. La exposición a 1.000 mg/m^3 de CO eleva el nivel de COHb en la sangre a más de 30 % y causa un rápido incremento del pulso, lo que provoca coma y convulsiones. De 1 a 2 horas de exposición a 1.830 mg/m^3 resulta en un 40 % de COHb en la sangre, lo que puede provocar la muerte.

El CO no produce alteraciones dañinas en vegetales o en animales con concentraciones inferiores a 100 ppm. Pero esta concentración jamás alcanza ese nivel en áreas urbanas.

Óxidos de nitrógeno (NO_x):

El porcentaje de éstos óxidos en los gases de combustión de los calefones es prácticamente despreciable, esto se debe, como se menciono anteriormente, a las altas temperaturas que se requieren para su formación. De todas formas es importante conocer los efectos causados por su exposición.

Los niños, los ancianos y las personas que sufren del corazón, de asma u otras enfermedades pulmonares son grupos de mayor riesgo para la exposición a NO_x . El NO_2 es un gas irritante que se absorbe en la membrana mucosa de las vías respiratorias. El efecto más adverso para la salud se produce en la intersección de las vías respiratorias y la región de intercambio gaseoso de los pulmones. Las vías superiores se ven menos afectadas porque el NO_2 no es muy soluble en superficies acuosas. La exposición esta vinculada a una mayor susceptibilidad a las infecciones respiratorias, una mayor resistencia de las vías respiratorias en los asmáticos y una disminución de la función pulmonar. La exposición breve se ha vinculado a una amplia gama de enfermedades de las vías respiratorias inferiores en los niños (tos, descarga nasal y dolor de garganta son los más comunes) así como a una mayor sensibilidad al polen y al polvo de las zonas urbanas.

Después de la exposición al NO_2 hay presencia de ácidos nítrico y nitroso o sus sales en la sangre y en la orina. Además, perjudica la visión de las personas que van manejando.

La función pulmonar se ve afectada por una exposición de 30 minutos a una concentración de NO_2 de $560 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ con ejercicio, $940 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ en personas asmáticas y más de $1.300 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ en una exposición de 10 a 15 minutos en personas sanas. En 11 estudios epidemiológicos de exposición a largo plazo se encontró que un incremento de $30 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ en las concentraciones de NO_2 en interiores de casas debido a cocinas de gas provoca un incremento de las enfermedades respiratorias del 20 % en los niños menores de 12 años. No obstante, no se ha demostrado coherentemente a partir de los estudios epidemiológicos que exista una relación entre la exposición de NO_2 en exteriores y efectos graves para la salud, debido a que intervienen otros factores, como la exposición a otros contaminantes, el hábito de fumar y la presencia de NO_2 en interiores. Se encontró que la exposición a una concentración media diaria de NO_2 de $244 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ provocaba dolores de garganta en personas adultas.

En otros estudios se encontró aumento de enfermedades agudas de pulmón con concentraciones de NO_2 entre 0,06 y 0,11 ppm para exposiciones de 24 hs. En niños de edad escolar, muy sensibles a los efectos de estos gases, se produjo aumento de bronquitis agudas con concentraciones de 0,06 a 0,08 ppm.

Metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2):

A pesar de que sólo pasa en raras ocasiones, una fuga de gas natural puede algunas veces ocurrir dentro del hogar (por mala instalación o falta de mantenimiento). Una fuga de gas puede ser peligrosa porque aumenta los riesgos de un incendio o explosión.

Las exposiciones a niveles bajo de gas natural (metano) y de dióxido de carbono (CO_2) no es dañina para la salud. Sin embargo, si la concentración de estos gases es severa, la cantidad de oxígeno disponible para respirar podría reducirse dramáticamente, lo cual puede conducir a asfixias. Los síntomas de asfixia van desde mareos, fatiga, náuseas, dolores de cabeza, respiración irregular, pérdida del conocimiento y hasta la muerte.

Dióxido de azufre (SO_2):

Los compuestos de azufre en la atmósfera causan graves daños a los materiales. La formación de ácido sulfúrico produce corrosión de metales, por lo que el S es eliminado casi por completo antes de introducirse el gas natural en los gasoductos.

El SO₂ produce broncoconstricción y este efecto se observa en individuos normales cuando las concentraciones llegan a 5 ppm; los mismos efectos aparecen en personas sensibles con 1 a 2 ppm de SO₂.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha determinado que los efectos de la exposición de los seres humanos en 24 horas al SO₂ incluyen la mortalidad a concentraciones en el ambiente superiores a 500 µg/m³ y una mayor morbilidad respiratoria aguda a concentraciones en el ambiente superiores a 250 µg/m³. No obstante, en estudios recientes se han observado efectos nocivos del SO₂ a concentraciones más bajas. Ostro (1994) estimó que una reducción de 10 µg/m³ de las concentraciones de SO₂ en el ambiente estaría asociada con una reducción de la mortalidad comprendida entre 0,20 % y 1,21 %, lo que equivaldría a una gama de 15 a 87 decesos por un millón de personas.

La tabla 4.2.2 muestra el efectos del dióxido de azufre (SO₂) en las personas.

Concentración	Efectos
0,03 ppm, promedio	Normas para la calidad del aire de 1974, lesiones crónicas en plantas.
0,037-0,092 ppm, media anual	Puede hacer, acompañadas por partículas a una concentración de 185µg/m ³ , un aumento en la frecuencia de síntomas respiratorios y enfermedades pulmonares.
0,11-0,19 ppm, media en 24 hs.	Con un bajo nivel de partículas puede haber un aumento en la admisión de personas de edad mayor en los hospitales, debido a trastornos respiratorios. Aumento en la tasa de corrosión de los metales.
0,19 ppm, media en 24 hs.	Puede haber un aumento en la mortalidad con bajos niveles de partículas.
0,25 ppm, media en 24 hs.	Puede haber un aumento en la tasa diaria de mortalidad, acompañada por partículas a una concentración de 750 µg/m ³ ; una marcada elevación en la tasa de morbilidad.
0,3 ppm, 8 hs.	Algunos árboles muestran lesiones.
0,52 ppm, promedio en 24 hs.	Puede haber un aumento en la mortalidad, acompañada por la presencia de partículas; puede aumentar la tasa de mortalidad.

Tabla 4.2.2 Daños sobre la salud a las distintas exposiciones de SO₂ en el aire.

Fuente: J. Morettón, *Contaminación del aire en Argentina*, Ediciones Universo, Buenos Aires, 2/1996, p. 29-30.

4.3 Consecuencias ambientales por los gases de combustión

Contaminación ambiental en Bs. As.

La Ley Nacional N° 20.284 (1973) y el código de prevención de la contaminación Ambiental (ordenanza N° 39.025, 1983) tienen la misma definición para contaminación atmosférica y contaminación ambiental, estableciendo que "La contaminación atmosférica es la presencia en la atmósfera de cualquier agente físico, químico o biológico, o de combinaciones de los mismos en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, seguridad o bienestar de la población, o perjudiciales para la vida animal y vegetal o impidan el uso y goce de las propiedades y lugares de recreación".

Existe una variedad muy grande entre las sustancias capaces de permanecer en el aire, y resulta difícil establecer una clasificación ordenada de las mismas. Sin embargo se puede clasificar a los contaminantes atmosféricos en 2 grupos:

Contaminantes primarios: aquellos procedentes directamente de las fuentes de Emisión (Ej: los productos de la combustión del calefón).

Contaminantes secundarios: aquellos originados por interacción química entre los contaminantes primarios y los componentes normales de la atmósfera.

También los contaminantes del aire se pueden clasificar de acuerdo a su composición química o física en:

◆ Partículas	◆ Compuestos halogenados
◆ Óxidos de azufre	◆ Compuestos radioactivos
◆ Hidrocarburos	◆ Derivados del plomo
◆ Óxidos de carbono	◆ Oxidantes fotoquímicos
◆ Dióxido de carbono	

La concentración de los contaminantes atmosféricos suele expresarse en 3 tipos de unidades. La primera, empleada para contaminantes gaseosos, es la de partes por millón en volumen, y cuyo símbolo es ppm. Algunas veces, las concentraciones se expresan también en partes por mil millones (ppb). La segunda unidad de concentración frecuentemente utilizada está basada en el peso por unidad de volumen de aire, expresada en microgramos por metro cúbico, y cuyo símbolo es $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se utiliza esta medida para las partículas y también para los gases. La tercera unidad, solo utilizada en la legislación de la Ciudad de Buenos Aires. Es la de miligramos por metro cúbico y el símbolo es mg/m^3 . La conversión entre ppm y $\mu\text{g}/\text{m}^3$ depende del peso molecular (PM) y del volumen ocupado por un mol de la sustancia. Bajo condiciones normales de temperatura (25°C) y presión (1 atm), la relación entre estas unidades es la siguiente:

$$\mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{\text{ppm} \cdot \text{PM}}{24,5} \times 10^3 \qquad \text{ppm} = \frac{\text{mg}/\text{m}^3}{\text{PM}} \cdot 24,5$$

Actualmente Brasil y la Provincia de Buenos Aires han adoptado los límites de Estados Unidos (ver tabla 4.3.1). Los límites que la Dirección Gral. de Política y Control Ambiental de la Ciudad de Buenos Aires tiene en cuenta son los establecidos en la Sección 2 del Código de Prevención de la Contaminación.

Los datos sobre los contaminantes atmosféricos en la ciudad de Bs. As. son muy limitados dado que la ciudad aún no cuenta con una red de monitoreo permanente. Esto se debe a que consideran que la ciudad de Buenos Aires esta situada en una gran planicie abierta, sin barreras a la circulación del aire.

En la actualidad solo hay dos estaciones de monitoreo permanente. La que pertenece al Gobierno de la ciudad de Bs. As. Mide humos, dióxido de azufre, óxidos de nitrógenos, polvo en suspensión, plomo y recientemente se sumo el monóxido de carbono. La otra pertenece a la Fundación Argentina Siglo 21, pero solo mide monóxido de carbono y desde 1992.

Contaminantes	EE.UU.	Brasil	Unión Europea	Provincia de Bs. As.	Ciudad de Bs. As.	OMS	Períodos
Dióxido de nitrógeno (NO₂)		320 µg/m ³		0,4 mg/m ³ 0,2 ppm (b)	0,4 mg/m ³ 0,21 ppm (a,b)	400 µg/m ³	1 hora
					0,1 mg/m ³ 0,053 ppm	150 µg/m ³	24 horas
						190-320 µg/m ³	Una vez al mes
	0.053 ppm	100µg/m ³ 100 µg/m ³	135 µg/m ³ (b)	0,1 mg/m ³ 0,053 ppm (b)			1 año
Ozono (O₃)	0.12 ppm 235 µg/m ³	160 µg/m ³	360 µg/m ³	0,235 mg/m ³ 0,12 ppm	0,1 mg/m ³ 0,05 ppm (a)	150-200 µg/m ³	1 hora
			110 µg/m ³			100-120	8 horas
					0,03 mg/m ³ 0,015 ppm		24 horas
Dióxido de azufre (SO₂)	0.03 ppm 80 µg/m ³	80µg/m ³	40-60µg/m ³	0,08 mg/m ³ 0,03 ppm		40-60 µg/m ³	1 año
	0.14 ppm 365 µg/m ³	365µg/m ³	100-150µg/m ³	0,365 mg/m ³ 0,14 ppm	0,07 mg/m ³	100-150µg/m ³	24 horas
				1,3 mg/m ³ 0,5 ppm (c)	0,5 mg/m ³ 0,19 ppm (a)	350 µg/m ³	1 hora
Monóxido de carbono (CO)					15 mg/m ³ 13 ppm (a)	100µg/m ³	15 minutos
						60 mg/m ³ 52,3 ppm	30 minutos
	35 ppm 40 mg/m ³	35 ppm				30 mg/m ³ 26 ppm	1 hora
	9 ppm 10 mg/m ³	9 ppm				10 mg/m ³ 8,7 ppm	8 horas
					3 mg/m ³		24 horas
Plomo (Pb)	1.5µg/m ³		2µg/m ³	0,0015 mg/m ³		0.5-0.1µg/m ³	1 año
					0,001 mg/m ³		24 horas
					0,01 mg/m ³		20 minutos
Partículas totales suspendidas (TSP)					0,500 mg/m ³ (a)	150	1 hora
		240 µg/m ³				60-90 µg/m ³	24 horas
					0,150 mg/m ³		1 mes
		80 µg/m ³					1 año
Materia particulada (PM-10)	0.12 ppm						1 hora
	150 µg/m ³	150 µg/m ³		0,15 mg/m ³			24 horas
	50 µg/m ³	50 µg/m ³		0,05 mg/m ³			1 año

Tabla 4.3.1 Límites establecidos para los contaminantes atmosféricos en Estados Unidos, Brasil, la Unión Europea, la Provincia de Buenos Aires, la Ciudad de Buenos Aires y por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Nota: (a) 20 minutos; (b) óxidos de nitrógeno; (c) 3 horas. Las celdas vacías significan que las normas no están disponibles o no se establecieron. Fuente: Dec. N° 3.395, Gerencia Ambiental, 6/9/96, p. 714.

La concentración de los gases contaminantes no sólo varía según la ubicación (zona de edificios, casas, campo, etc.), sino que se encuentra una gran variación según los horarios. Un estudio realizado un domingo de 1999 denoto una concentración de CO (aproximadamente a las once del mediodía) de 1,1 ppm, ésa misma noche (a las once y cincuenta minutos) luego de un partido de fútbol se obtuvo un máximo de 38 ppm.

La tabla 4.3.2 muestra la concentración de CO promedio en Buenos Aires.

Hora	Lugar	Agosto de 1993	Junio de 1994	Octubre de 1995	Mayo de 1996	Aumento 1993/1996
9.00	Corrientes y Madero (Centro)	18	21.5	19.3	24.2	34.4 %
18.00	Corrientes y Madero (Centro)	26	22.4	26.1	28.2	8.4 %
9.00	Corrientes y Pellegrini (Centro)	23	27.2	21.6	26.5	15.2 %
18.00	Corrientes y Pellegrini (Centro)	17	25.6	27.1	27.8	63.5 %
9.00	Esmeralda y Córdoba (Centro)	25	22.4	31.2	27.4	9.6 %
18.00	Esmeralda y Córdoba (Centro)	20	24.8	29.4	30.5	52.5 %
9.00	Corrientes y L. N. Alem (Centro)	26	24.3	29.3	28.3	8.8 %
18.00	Corrientes y L. N. Alem (Centro)	26	33.1	31.8	42.5	63.4 %
9.00	San Martín y Tucumán (Centro)	28	29.2	26.5	24.3	- 15.2 %
18.00	San Martín y Tucumán (Centro)	33	30.5	27.6	36.3	10 %
9.00	Sta. Fe y J. B. Justo (Palermo)	28	26.7	31.5	32.4	15.7 %
18.00	Sta. Fé y J. B. Justo (Palermo)	28	37.2	33.4	37.8	35 %
9.00	Bmé. Mitre y Pueyrredón (Once)	22	31.8	35.6	33.2	50 %
18.00	Bmé. Mitre y Pueyrredón (Once)	30	39.1	36.3	40.3	34.3 %
9.00	F. Alcorta y Pueyrredón (Recoleta)	31	34.2	30.6	35.4	14.1 %
18.00	F. Alcorta y Pueyrredón (Recoleta)	62	58.0	67.1	68.2	10 %
Promedio total		27.6	33.8	35.1	37.5	35.8 %

Tabla 4.3.2 Concentraciones de CO promedio por hora en Bs. As. (en ppm)

Fuente: B. Anural, Banco Mundial, 9/1997, p. 241.

En algunas esquinas de Buenos Aires, la concentración de CO creció en los últimos 5 años un 25 %, y en las horas de mayor tráfico automotor supera con amplitud los porcentajes indicados como aceptables por la OMS. En sectores del micro-centro de la ciudad y en el barrio de Once, por ejemplo, aumentó hasta un 50% y en la esquina del Obelisco se registran 26.5 ppm (Según las mediciones de Xilix S.A., empresa privada de consultoría ambiental).

Las fuentes contaminantes.

Según estudios de la Subsecretaría de Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad, el 80 % de la contaminación ambiental es producida por vehículos.

Los vehículos a nafta emiten el 85 % de CO y 80 % de HC, en tanto los vehículos diesel liberan el 98 % de SO₂, 60 % de NO_x y 63 % de material particulado. En estudios realizados se estima que por cada 100 vehículos que recorren las calles se eliminaban a la atmósfera diariamente 3 toneladas de CO, 400 kg. de HC y 240 kg. de NO_x.

Si se comparan éstas cifras con los productos de la combustión de los calefones se observa que estos últimos son despreciables. Como se dijo anteriormente las concentraciones de NO_x y SO₂ que emite un calefón se ignoran por su bajísimo valor, pero si se quiere comparar el CO se obtiene que:

Un calefón medio consume unas 25000 kcal/h, si consideramos al equipo las 24 hs encendido (caso inusual) obtenemos que un calefón generó 600000 Kcal.

Dado que el poder específico inferior (PCI) del metano es 9000 Kcal/m³ se obtiene un volumen de CH₄ quemado igual a:

$$Q = V * PCI \Rightarrow V = \frac{Q}{PCI} \Rightarrow V = \frac{600000 \text{ kcal}}{9000 \text{ kcal/m}^3} \Rightarrow V = 66,67 \text{ m}^3$$

Si por cada m³ de CH₄ se generan 3 m³ de producto de la combustión, obtenemos que al quemar los 66,67 m³ de CH₄ se generan 200 m³ de productos de la combustión.

En el peor de los casos (mal funcionamiento dentro de las normas) el 0,1 % de esos 200 m³ es CO, por lo que al quemar 66,67 m³ de metano se generan 0,2 m³ de CO.

Ahora bien, si se considera al CO como gas ideal, se tiene que a 25 °C y 1 atm de presión, un mol de CO ocupa 0,0245 m³ (24,5 dm³), por lo que 0,2 m³ de CO contiene 8,17 moles. Para conocer cuanto pesan estos 8,17 moles hay que saber que el peso molecular (PM) del CO es 28 g/mol y por lo tanto la cantidad en peso de CO emitido por un calefón encendido las 24 hs es:

$$m = PM n \Rightarrow m = 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}} 8,17 \text{ mol} \Rightarrow m = 229 \text{g} = 0,23 \text{ kg}$$

Anteriormente se dijo que por cada 100 vehículos que recorren las calles se eliminan a la atmósfera diariamente 3 toneladas (3000 Kg) de CO. Si se consideran 100 calefones encendidos durante 24 hs, y funcionando justo en el límite que establece la norma para la emisión de CO se tiene una eliminación a la atmósfera de 23 Kg de CO; es decir el 0,76 %.

Es por esta razón que al gas natural se lo denomina gas ecológico, no por no emitir gases contaminantes, sino por ser su proporción despreciable frente a otras fuentes de energía.

El calentamiento global

Las toneladas de monóxido de carbono que se emiten en la RMBA también contribuyen con el calentamiento global, esto se debe a que el CO tiende a reaccionar con otros compuestos, sobre todo los radicales de hidroxilo (OH), reduciendo por ello la presencia de éstos en el aire. La reducción de radicales de hidroxilo es importante, porque normalmente éstos reaccionan con otros gases, como el metano, y los eliminan; como los radicales de hidroxilo son eliminados por el CO, se permite que sobreviva más metano y que suba a la atmósfera superior, donde puede aumentar el calentamiento global. Es por ello que al metano se lo considera gas de efecto invernadero junto con el CO₂, aunque el dióxido de carbono tiene una capacidad 21 veces menor que el metano para producir efecto invernadero.

Contaminación ambiental mundial

La Argentina no es contada entre los países más contaminados, probablemente debido a sus grandes extensiones despobladas y semidesérticas. El consumo de combustibles fósiles no llega al 1 % del mundial y en emisiones de monóxido de carbono (CO) se ubica en el puesto número 27 del ranking internacional y en el 33 en lo que se refiere a los gases que aumentan la temperatura del planeta.

Como es sabido, el calentamiento global del planeta y la cantidad de muertes por año por la contaminación del aire es un tema que preocupa al mundo. En diciembre de 1999 fue lanzado Terra, una nave insignia del Sistema de Observación Terrestre para reunir información de la contaminación global.

Durante un encuentro de la Unión Geofísica Americana realizado en Boston, John Gille, del Centro Nacional para la Investigación Atmosférica., afirmó que «Con estas nuevas observaciones, uno puede ver

claramente que la contaminación del aire es más que un problema local. Es un problema global». Al vigilar los niveles de monóxido de carbono en la atmósfera, el observatorio orbital Terra ha demostrado que los gases en el aire no respetan fronteras nacionales.

Gille y sus colegas presentaron las nuevas imágenes (ver figura 4.3.1) que grafican las cantidades de monóxido de carbono en la capa que se encuentra entre tres y cinco kilómetros de altura sobre la superficie, denominada troposfera, donde los contaminantes interactúan con otros gases para formar smog, sustancia que puede subir aún más y viajar grandes distancias, o bien bajar a la superficie, donde es aspirado por los seres humanos y animales.

Si bien el satélite no puede diferenciar las fuentes individuales de contaminación, sí puede distinguir la contaminación de zonas metropolitanas y bosques específicos. Según los investigadores de la NASA, aproximadamente el 50 por ciento de las emisiones de monóxido de carbono provienen de actividades humanas.

También se ha podido encontrar el rastro de otros contaminantes, como los óxidos nitrosos.

Los incendios forestales en África y Sudamérica llevan grandes concentraciones de humo a lugares tan lejanos como Australia, mientras las fábricas e incendios en el sudeste de Asia hacen lo mismo hacia América del Norte.

La mayor parte del hemisferio norte parece cubierto por una permanente neblina verde, evidencia de persistentes, aunque menores, emisiones de monóxido de carbono.

En las imágenes con colores artificiales obtenidos por Terra, las zonas rojo brillante presentan las mayores concentraciones de monóxido de carbono, y se les encuentra en lugares como el centro de África, el Amazonas, el sudeste de Asia y ocasionalmente América del norte y Europa. Es en esas regiones donde las industrias, el tránsito y los incendios, tanto naturales como causados por el hombre, lanzan nubes de monóxido de carbono que cubren los océanos.

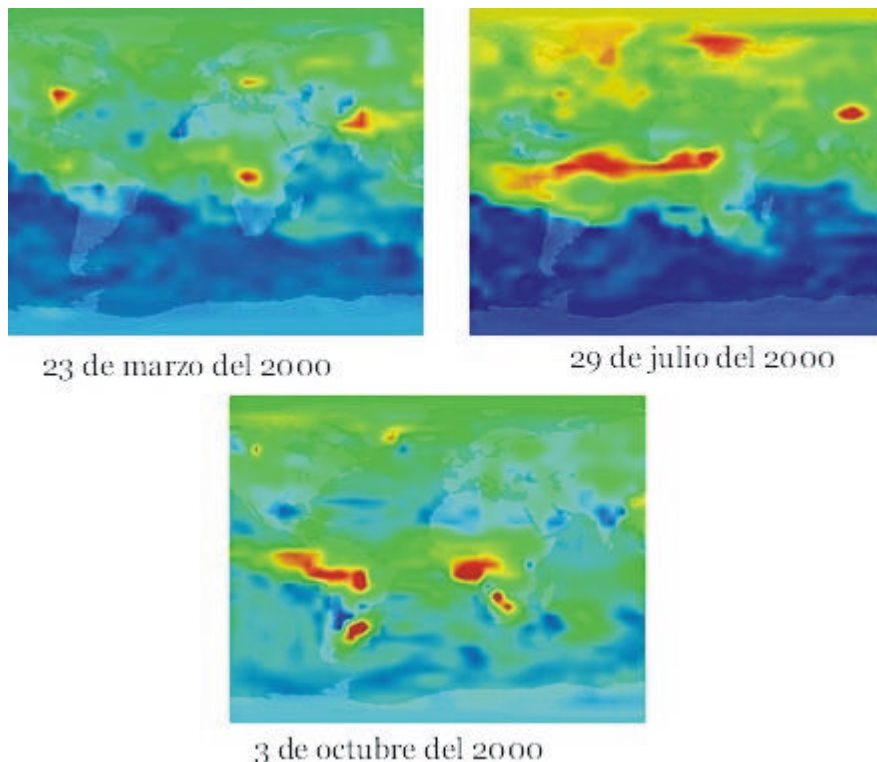


Figura 4.3.1 Concentraciones de CO global en distintas fechas.

Conclusión

La combustión incompleta de los artefactos alimentados a gas, día tras día, va tomando víctimas fatales con cifras cada vez más alarmantes. La falta de información de la población referido al tema y la falta de mantenimiento que se hacen a estos equipos, provoca en época invernal medio centenar de muerte solo en capital federal.

A partir del 1º de marzo del 2000 debió incorporarse a los artefactos domésticos alimentados a gas, el piloto analizador de ambiente.

La falta de documentación normativa y técnica por parte del ente regulador y la cámara Argentina de fabricación de artefactos a gas, sumado al desconocimiento de las curvas características del producto por parte de los fabricantes, fueron los causantes de que dicha fecha se prorrogue hasta el 1 de julio del 2002.

El análisis llevado a cabo en este trabajo muestra la existencia de un mercado potencial satisfactorio y la factibilidad técnica de incorporar los pilotos analizadores, no solo a los equipos de combustión de bajo poder calorífico, sino que es factible la aplicación de éste elemento de seguridad para equipos de gran consumo térmico como el calefón.

El presente trabajo aspira a ser un aporte válido que sirva de orientación para definir los lineamientos para la compresión, fabricación y determinación de las curvas características con que contarán los nuevos dispositivos de seguridad en los equipos domésticos alimentados a gas.

Bibliografía

- Ángel Vian Ortuño, Introducción a la química industrial, Editorial Reverté S.A., Segunda Edición, España 1998, Página 49.
- Charles E. Mortimer, Química, Grupo editorial Iberoamérica, Quinta edición.
- Fissores A. y Contreras J., Contaminación producida por estufas que no evacuan los productos de combustión, Revista Información Tecnológica, Editorial Jose Valderrama centro de información tecnológica, Bs. As. 1996.
- Enciclopedia Gas y Electricidad, tomo 4 y 5, Editorial. Oceano/Centrum.
- George A. Adebiji y Lynn D. Russell, Termodinámica clásica, Editorial Addison-Wesley Liberoamericana, E.U.A. 1993
- Giuliano Salvi, La combustión teoría y aplicaciones, Editorial Dossat S.A. Segunda Edición.
- INTI, curso para ingenieros : Combustión, registro Nro. 0622662.6/9/A691.
- Kirk - Othmer, Enciclopedia de tecnología química, Editorial Hispano-America, México 1962, Tomo V Página 539-561, Tomo VII Páginas 581-625, Tomo IX Páginas 161-177 y 338-361, Tomo XIII Pagina 453-472
- Márquez, Combustión y quemadores, Editorial Marcombo
- Morán y Shapiro, Fundamentals of Engineering Thermodynamics, Secon Edition, Edit John Wiley & Sons Inc.
- Moretón J., Contaminación del aire en Argentina, Ediciones Universo, Buenos Aires 1996, páginas 29-30.
- Néstor Pedro Quadri, Instalaciones de gas, editorial Alsina, 1998
- Orel Rodolfo, Calculo de la combustión, Editorial Alsina
- Robert T. Morrison y Robert N. Boyd, Química orgánica, Editorial Addison-Wesley Liberoamericana., Quinta Edición, New York University, Páginas 39-119
- Revista Gas & Gas, Publicación para la industria gasífera, Abril 2001, página 76
- Sibila Camps, Un gas altamente tóxico, Clarín, Buenos Aires, 21/11/97, pág. 43.
- Torreguitar, R.F y Weiss A.A, Combustión y generación de vapor
- Universidad de Antioquia, Departamento de investigación y desarrollo: Emisión de monóxido de carbono y metano en un quemador atmosférico de gas natural, Colombia 2001.

Normas y Resoluciones:

- ENARGAS, Resolución ENARGAS Nº 622/98
- ENARGAS, Normas para calentadores de agua para uso domestico
- ENARGAS, Especificaciones técnicas ET-ENRG-GD Nº 9, especificaciones técnicas para dispositivo sensores de atmósfera
- Gerencia Ambiental, dec Nº 3.395, 6/9/96, pág. 714

Entrevistas realizadas:

- Sta. Luciana Anim, Asistente de marketing de la firma Orbis S.A.
- Arquitecta Lorena Martinez Zubeldía, área construcción de la firma Eskabe S.A.
- Ing. Pedro Martos, Presidente del Instituto del gas Argentino (IGA)

Páginas consultadas:

- www.niacd.nih.gov/health/pubs_span/gasdtctr_span.htm#med
- www.barrameda.com.ar/noticias/contam01.htm
- <http://usuarios.lycos.es/malosaires/indice.htm>
- <http://baire.cop4.org/docs/ficha22.html>
- <http://132.248.56.130/qo1/MO-CAP2.htm>
- <http://www.tonalpym.com.ar/notasdossier/dos579.htm>
- <http://www.iae.org.ar/informacion.htm>
- http://www1.worldbank.org/nars/DL_courses/Cleanair/Course1/lecci%C3%B3n_8.htm
- www.enargas.gov.ar

