(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 662 393**

(51) Int. CI.:

F23D 14/32 (2006.01)
F23D 14/58 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.03.2015 E 15000799 (5)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.02.2018 EP 2924357**

(54) Título: **Quemador de oxígeno-combustible de llama plana de velocidad de combustión baja con aporte escalonado de oxígeno**

(30) Prioridad:

24.03.2014 US 201461969302 P
03.03.2015 US 201514636287

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
06.04.2018

(73) Titular/es:

AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC. (100.0%)
7201 Hamilton Boulevard
Allentown, PA 18195-1501, US

(72) Inventor/es:

TUNC, GORUNEY y
XIAOYI, HE

(74) Agente/Representante:

DURAN-CORRETJER, S.L.P

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Quemador de oxígeno-combustible de llama plana de velocidad de combustión baja con aporte escalonado de oxígeno

ANTECEDENTES

Esta solicitud se refiere a un quemador de oxígeno-combustible de llama plana escalonado, y en particular, a un quemador de oxígeno-combustible de llama plana escalonado que puede alcanzar velocidades de combustión mucho más bajas que los quemadores existentes actualmente.

Se conocen quemadores de oxígeno-combustible de llama plana escalonados, incluyendo el quemador descrito en la patente U.S.A. número 5.611.682, que se incorpora a la presente memoria como referencia en su totalidad. Se conocen asimismo quemadores de oxígeno-combustible de llama plana no escalonados, incluyendo el quemador descrito en la patente U.S.A. número 5.575.637, que se incorpora a la presente memoria como referencia en su totalidad. Ambas patentes son propiedad del cesionario de la presente solicitud.

La extensión de los diseños de patente '682 y '637 a aplicaciones de baja velocidad de combustión no es un problema sencillo, y los intentos de simplemente reducir la geometría del quemador no han sido satisfactorios. En particular, un reto ha sido impedir que el bloque del quemador se sobrecaliente a bajas velocidades de combustión, produciendo al mismo tiempo una llama estable y luminosa deseada para fundir vidrio. Este equilibrio ha sido especialmente esquivo en los quemadores diseñados utilizando reglas estándar de ampliación/reducción para fabricar un quemador pequeño de oxígeno-combustible de llama plana con escalonamiento de oxígeno basado en los principios de diseño de los quemadores más grandes, tal como los que se describen en las patentes '682 y '637.

La patente U.S.A. número 5.725.367 da a conocer un quemador de oxígeno-combustible de llama plana, según el preámbulo de la reivindicación 1.

La presente solicitud se refiere a un enfoque de diseño y a un quemador resultante que tiene una geometría y unos parámetros de funcionamiento que impiden el sobrecalentamiento del bloque del quemador en todo el intervalo operativo, debido a una selección sistemática de las dimensiones relativas y absolutas de la cámara de precombustión y de las toberas de combustible y oxígeno.

CARACTERÍSTICAS

En el presente documento se describen diversas realizaciones de un quemador de oxígeno-combustible de llama plana que pueden conseguir bajas velocidades de combustión.

En una realización, un quemador de oxígeno-combustible de llama plana incluye una tobera de combustible gaseoso, un conducto de oxidante principal y una cámara de precombustión. La tobera de combustible gaseoso tiene un extremo de salida, una anchura w, una altura a, un diámetro hidráulico $D_{h\text{-}NG}$, y una relación anchura/altura w/a, por lo menos, de aproximadamente 2. El conducto de oxidante principal está posicionado concéntricamente rodeando la tobera de combustible para formar una tobera de oxidante principal anular sustancialmente uniforme entre la tobera de combustible y el conducto de oxidante principal, teniendo el conducto de oxidante principal una altura b, teniendo la tobera de oxidante principal un extremo de salida alineado con el extremo de salida de la tobera de combustible. La cámara de precombustión se extiende desde el extremo de salida de las toberas de combustible y de oxidante hasta un extremo de llama, teniendo la cámara de precombustión una longitud L, y un diámetro hidráulico D_h; La relación L/D_h de la cámara de precombustión es mayor que 0 y menor o igual que aproximadamente 4. La longitud de la cámara de precombustión normalizada según el diámetro hidráulico de la tobera de combustible $L/D_{h\text{-}NG}$ es mayor que 0 y menor o igual que aproximadamente 12, aproximadamente. Las dimensiones a, b y w están dimensionadas de tal manera que el oxidante principal tiene un número de Reynolds de, aproximadamente, 200 a, aproximadamente, 22.000 cuando el quemador se hace funcionar a una velocidad de combustión de, aproximadamente, 52,75 a, aproximadamente, 1055 MJ/h (de, aproximadamente, 0,05 a, aproximadamente, 1 MMBtu/h).

En una variación, la relación entre w y a es de, aproximadamente, 2 a, aproximadamente, 60. En una variación adicional, la relación entre w y a es de, aproximadamente, 5 a, aproximadamente, 30.

En otra variación, la anchura w de la tobera de combustible es de, aproximadamente, 1,905 a, aproximadamente, 7,62 cm (de, aproximadamente, 0,75 a, aproximadamente, 3 pulgadas). En una variación adicional, la anchura w de la tobera de combustible es de, aproximadamente, 2,54 a, aproximadamente, 5,08 cm (de, aproximadamente, 1 a, aproximadamente, 2 pulgadas).

En otra variación, la longitud L de la cámara de precombustión es mayor que 0 cm (0 pulgadas) y menor que, aproximadamente, 10,16 cm (aproximadamente, 4 pulgadas). En una variación adicional, la longitud L de la cámara

de precombustión es de, aproximadamente, 1,27 a, aproximadamente, 5,08 cm (de, aproximadamente, 0,5 a, aproximadamente, 2 pulgadas).

En otra variación, la cámara de precombustión tiene una geometría divergente y la relación entre el diámetro hidráulico en el extremo de la llama de la cámara de precombustión y el diámetro hidráulico de la tobera de combustible es de, aproximadamente, 6 a, aproximadamente, 10. En una variación adicional, la cámara de precombustión tiene una geometría divergente y la relación del diámetro hidráulico en el extremo de la llama de la cámara de precombustión respecto al diámetro hidráulico de la tobera de combustible es de, aproximadamente, 6 a, aproximadamente, 8.

En otra variación, el quemador incluye además una tobera de oxidante escalonada separada del conducto de oxidante principal y en general paralela al mismo.

En otra variación más, el quemador incluye además disruptores de la capa límite situados a lo largo de, por lo menos, una parte de una pared de, por lo menos, una de la tobera de combustible y la tobera del oxidante primaria, estando configurados los disruptores de la capa límite para aumentar la turbulencia del flujo de oxidante en el paso del oxidante principal. En una variación adicional, los disruptores de la capa límite se seleccionan del grupo que comprende: concavidades, entrantes, protuberancias, incisiones, ranuras, canales, mallas y combinaciones de los mismos. En una variación, los disruptores de la capa límite están situados a lo largo de, por lo menos, una parte de la pared interior de la tobera del oxidante principal y están configurados para aumentar la turbulencia del oxidante que fluye en el paso del oxidante principal. En otra variación, por separado o en combinación con otras variaciones, los disruptores de la capa límite están situados a lo largo de, por lo menos, una parte de la pared exterior de la tobera de combustible y están configurados para aumentar la turbulencia del oxidante que fluye en el paso del oxidante principal. En otra variación más, por separado o en combinación con otras variaciones, los disruptores de la capa límite están situados a lo largo de, por lo menos, una parte de la pared interior de la tobera de combustible y están configurados para aumentar la turbulencia del combustible que fluye en el paso del combustible.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La figura 1 es una vista en sección transversal lateral de una realización de un quemador y un bloque del quemador que muestra algunas de las dimensiones relevantes.

La figura 2 es una vista extrema desde un extremo, de la realización de un quemador y un bloque del quemador de la figura 1 que muestra dimensiones relevantes adicionales.

La figura 3 es un par de gráficos que muestran el número de Nusselt como una función del número de Reynolds en un número de Prandtl de 0,7. Izquierda: Tubería redonda de área constante. Derecha: Canal de placa paralela. Adaptado de Abraham y otros, "Internal-flow Nusselt numbers for the low-Reynolds end of the laminar-to-turbulent transition regime", ("Números de Nusselt de flujo interno para el extremo de números de Reynolds bajos del régimen de transición laminar a turbulento"), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 (1-3): 5 (2011).

La figura 4 es una tabla gráfica que muestra el sobrecalentamiento del bloque del quemador en función de la cámara de precombustión L/Dh, el porcentaje de flujo de oxígeno principal y el número de Reynolds de flujo de oxígeno principal. Los valores en rectángulos muestran el número de Reynolds del flujo de oxígeno principal a temperatura ambiente y presión ambiente, donde los valores mostrados en rectángulos marcados con un cuadrado ubicado en la esquina superior izquierda representan valores menores que el número crítico de Reynolds para un flujo de tubería redonda de 2.300. Los valores en círculos muestran la mínima relación L/Dh a la que se observa el sobrecalentamiento del bloque del quemador (sin círculo significa ausencia de sobrecalentamiento).

Las figuras 5A-5D son representaciones gráficas de resultados de dinámica de fluidos computacional (CFD) para diversas configuraciones geométricas y condiciones de funcionamiento.

La figura 6 es un gráfico de la longitud de la cámara de precombustión normalizada según el diámetro hidráulico de la tobera de combustible, en función de la velocidad de combustión relativa de quemadores mayores, tal como los que se describen en las patentes '682 y '637, y el quemador de velocidad de combustión inferior descrito en la presente memoria.

La figura 7 es una vista en sección transversal de la mitad de las toberas de oxígeno y de combustible, que muestra el paso de oxidante entre dichas toberas, para su utilización en la ilustración de diversos disruptores de la capa límite, tal como los que se muestran en las figuras 8-10.

Las figuras 8A y 8B son vistas en sección transversal y en planta, respectivamente, de las toberas según la figura 7, que muestran los disruptores de la capa límite en forma de concavidades o protuberancias.

Las figuras 9A y 9B son vistas en sección transversal y en planta, respectivamente, de las toberas según la figura 7, que muestran disruptores de la capa límite en forma de ranuras rectangulares transversales a la dirección del flujo.

Las figuras 10A y 10B son vistas en sección transversal y en planta, respectivamente, de las toberas según la figura 7, que muestran disruptores de la capa límite en forma de malla.

La figura 11 es una vista en sección transversal de las toberas de oxígeno y de combustible mostradas en parte en la figura 7, que muestra una comparación entre flujo laminar en el paso de oxidante (sin disruptores de flujo) y flujo turbulento en el paso de oxidante (disruptores de flujo presentes).

DESCRIPCIÓN DETALLADA

Las figuras 1 y 2 muestran una realización a modo de ejemplo de un quemador de oxígeno-combustible de llama plana escalonado con dimensiones relevantes. Las dimensiones, que se describirán en detalle en este documento, son las siguientes:

L Longitud de la cámara de precombustión

D Altura de la cámara de precombustión

a Altura del paso de gas combustible

b Altura interior de la tobera de gas oxidante principal

c Altura del paso de gas oxidante principal

w Anchura de la tobera de gas combustible y de gas oxidante (igual para ambos para mantener b constante)

D_h Diámetro hidráulico (4 veces el área de la sección transversal dividida por el perímetro).
Para un círculo $4\pi r^2/2\pi r = 2r$; Para la tobera de combustible: $D_{h\text{-}NG}$

En las realizaciones de las patentes '682 y '637, la longitud L de la cámara de precombustión es de 2,54 a 60,96 cm (1 a 24 pulgadas) y, preferentemente, de 10,16 a 20,32 cm (de 4 a 8 pulgadas); la tobera de combustible y la tobera escalonada tienen un anchura de 10,16 a 101,6 cm (de 4 a 40 pulgadas) y, preferentemente, de 20,32 a 60,96 cm (de 8 a 24 pulgadas); y la velocidad de combustión es de 527 a 42.202 MJ/h (0,5 a 40 MMBtu/h) y, preferentemente, de 1.055 a 21.101 MJ/h (de 1 a 20 MMBtu/h). Además, la relación entre el diámetro hidráulico del extremo de la llama de la cámara de precombustión y el diámetro hidráulico de la tobera de combustible es de 1 a 6.

En un quemador, tal como el que se representa en las figuras 1 y 2, se proporciona un flujo anular de gas oxidante principal en la abertura anular, que tiene una dimensión c que rodea un flujo central de gas combustible en la abertura, que tiene una dimensión a. El gas oxidante principal actúa como un medio de refrigeración entre la interfase de combustión del combustible y el oxidante, retirando el calor generado por la llama de oxígeno-combustible dentro de la cámara de precombustión e impidiendo de este modo el sobrecalentamiento del bloque del quemador.

Sin embargo, para una geometría de tobera de quemador dada, a bajas velocidades de combustión y condiciones altamente escalonadas (es decir, cuando una gran proporción del oxidante fluye a través de la tobera del oxidante secundario en escalonamiento y no de la tobera de oxidante principal), el caudal de gas oxidante principal se puede hacer tan bajo que el flujo experimente una transición de turbulento a laminar y pase a ser laminar. La velocidad de refrigeración convectiva asociada con el flujo laminar es significativamente menor que la del turbulento. Como resultado, la refrigeración proporcionada por el flujo de gas oxidante principal puede ser incapaz de retirar suficientemente el calor generado por la llama de oxígeno-combustible en el interior de la cámara de precombustión, permitiendo de este modo que el bloque del quemador se sobrecaliente y falle.

En el paso/flujo de oxidante principal, el número de Reynolds se calcula como:

Ecuación 1: $Re_{prim\text{-}O2} = \rho\, Q/\{\mu \cdot [w + \pi/4 \cdot (a + b)]\}$,

donde Q es el caudal volumétrico, ρ es la densidad, μ es la viscosidad dinámica del oxidante principal, y ρ y μ se especifican a una temperatura particular.

Para un porcentaje dado de flujo total de oxidante introducido en el orificio de escalonamiento, el caudal de gas oxidante que pasa a través del paso de gas oxidante principal alrededor del gas combustible es proporcional a la velocidad de combustión. A una velocidad de combustión dada, la distribución del flujo que pasa a través del paso de gas oxidante principal y el paso de gas oxidante escalonado puede controlarse por medio de una válvula de desviación aguas arriba.

Siempre que la velocidad de refrigeración convectiva proporcionada por el flujo de gas oxidante principal sea igual o mayor que el calor generado por la llama en el interior de la cámara de precombustión, la llama puede pasar a través de la cámara de precombustión sin dañar las paredes del bloque del quemador. La velocidad de refrigeración convectiva es proporcional al número de Nusselt (Nu), que depende fuertemente del número de Reynolds, tal como se muestra en la figura 3. Se debe observar que el paso de gas oxidante principal con forma anular puede caracterizarse por estas dos geometrías extremas que unen el presente diseño, es decir, la tubería redonda y el canal de placa paralela. Tal como se puede ver por la figura 3, por debajo de un número de Reynolds crítico en el que el flujo se define como laminar, el número de Nusselt y, por lo tanto, la velocidad de refrigeración convectiva caen significativamente y permanecen constantes.

La figura 4 muestra los resultados de las pruebas que se llevaron a cabo utilizando gas natural como el gas combustible y oxígeno puro como el gas oxidante para una velocidad de combustión de 52,75 a 1.055 MJ/h (de 0,05 a 1,0 MMBtu/h). El flujo principal de oxígeno varió del 25 % al 100 %, representativo del escalonamiento completo y ausencia de escalonamiento, respectivamente. L/D_h de la cámara de precombustión (D_h definido en el extremo de la llama de la cámara de precombustión) fue de 1,6 a 5,8 para evaluar el efecto de los parámetros mencionados anteriormente sobre el sobrecalentamiento del bloque del quemador.

Tal como se muestra en la figura 4, es más probable que se produzca un sobrecalentamiento del bloque del quemador a medida que aumenta L/D_h de la cámara de precombustión, disminuye la velocidad de combustión, disminuye el número de Reynolds del flujo principal de oxígeno y aumenta el escalonamiento (proporción de oxidante secundario frente a oxidante principal). Notablemente, el sobrecalentamiento del bloque del quemador se produce sistemáticamente a números de Reynolds por debajo del número de Reynolds crítico calculado a temperatura ambiental y presión ambiental, tal como se representa mediante números en rectángulos marcados con un cuadrado ubicado en la esquina superior izquierda.

Los resultados sugieren que el paso de oxidante principal se debería diseñar para aumentar el número de Reynolds tanto como sea posible para minimizar/prevenir el sobrecalentamiento del bloque del quemador. Tal como puede observarse en la ecuación 1, para determinados ρ y μ (características del oxidante) y Q (caudal de oxidante, que corresponde a la velocidad de combustión y el porcentaje de escalonamiento), el número de Reynolds aumentará a medida se reduzcan las dimensiones w, a, y b.

Sin embargo, reducir la dimensión a impone ciertos desafíos de fabricación. Además, reducir la dimensión b implica algunos costes, ya que una b menor aumentaría la velocidad primaria del oxígeno, y lo cual aumentaría la refrigeración por convección, pero incrementaría asimismo la mezcla entre los flujos de gas natural y de oxígeno, liberando potencialmente calor a mayor velocidad dentro de la cámara de precombustión. Además, reducir la dimensión w requiere hacer menor la anchura del paso para que tanto las toberas de oxígeno principal como las de gas natural mantengan una dimensión c constante a lo largo de la periferia y, de este modo, un perfil de la velocidad de oxígeno relativamente uniforme. Por último, el efecto de w en Re es mayor que el de a o el de b, ya que $\pi/4 < 1$.

Se llevaron a cabo simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) en diversas configuraciones geométricas utilizando el software ANSYS Fluent, disponible comercialmente, que simula el flujo de fluidos, la transferencia de calor y la combustión mediante la resolución de las ecuaciones gobernantes para la conservación de la masa, del momento y de la energía. En la figura 5 se muestra un resumen de los resultados de la simulación de CFD. En la figura 5, el sentido de la combustión es de derecha a izquierda.

En el modelo, se compara una temperatura representativa a una profundidad dada dentro de la cámara de precombustión. La figura 5a muestra el caso base.

La figura 5b muestra un caso en el que, en comparación con la figura 5a, el L/D_h de la cámara de precombustión se ha aumentado en un 30 %, la dimensión b se ha reducido en un 24 % y la dimensión a se ha reducido en un 17 %. El resultado de estas modificaciones es que la temperatura de la pared de la cámara de precombustión en el punto especificado aumentó en 38,3 ^{o}C (69 °F), lo que significa que el 30 % de aumento de la longitud de la cámara de precombustión supera el aumento de beneficio de un número de Reynolds un 21 % mayor en el paso de oxidante.

La figura 5c muestra un caso en el que, en comparación con la figura 5a, el L/D_h de la cámara de precombustión se ha reducido en un 20 % y la dimensión b se ha aumentado en un 29 % para conseguir una disminución del 4 % en el número de Reynolds del oxígeno. El resultado de estas modificaciones es que la temperatura de la pared de la cámara de precombustión en el punto especificado disminuyó en 98,9 ^{o}C (179 °F), lo que significa que el beneficio de una longitud de la cámara de precombustión reducida en un 20 % supera las pérdidas de enfriamiento debido a un número de Reynolds un 4 % menor.

La figura 5d muestra un caso en el que, en comparación con la figura 5c, el L/D_h de la cámara de precombustión se ha aumentado en un 5 % (disminución del 17 % en comparación con la figura 5a), la dimensión b se ha aumentado en un 29 % (igual que en la figura 5c), y la dimensión a se ha reducido en un 17 % (lo mismo que en la figura 5b) para producir un número de Reynolds un 10 % mayor en el paso de oxidante. El resultado de estas modificaciones es que la temperatura de la pared de la cámara de precombustión en el punto especificado disminuyó otros 23,9 ^{o}C

(43 °F) con respecto a la temperatura de la figura 5c, lo que muestra que el número de Reynolds un 10 % mayor compensa la disminución del 5 % en la longitud de la cámara de precombustión.

Los resultados de las cuatro simulaciones de CFD mostradas en las figuras 5a a 5d se resumen a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1

Caso	**5a**	**5b**	**5c**	**5d**
T (°C (°F))	301,1 (574)	339,4 (643)	201,7 (395)	177,8 (352)
L/D_h	2,4	3,2	1,9	2,0
Re	base	+21 %	-4 %	+10 %
b	base	-24 %	+29 %	+29 %
w	base	-17 %	±0 %	-17 %

En resumen, estos resultados sugieren inesperadamente que el efecto del número de Reynolds del flujo de oxígeno principal en el sobrecalentamiento del bloque del quemador es secundario en comparación con la altura del paso del oxidante principal, que determina la altura de la cámara de precombustión y la velocidad primaria del oxígeno. Un paso de oxidante principal más estrecho se traduce en: (1) una distancia más corta entre la fuente de calor, es decir, la llama y las paredes de la cámara de precombustión, lo que da como resultado una temperatura más elevada a una profundidad dada en el interior de la cámara de precombustión; y (2) una mayor velocidad de oxígeno principal, que da como resultado una mezcla incrementada entre los flujos de oxígeno y gas natural, y por ello un comienzo anterior de la liberación de calor en el interior de la cámara de precombustión, teniendo de nuevo como resultado una mayor temperatura a una profundidad determinada dentro de la cámara de precombustión.

Los resultados indican también que la temperatura del bloque del quemador puede reducirse de forma efectiva combinando el aumento del Re del oxígeno principal y la disminución de L/D_h en la cámara de precombustión.

Para un quemador diseñado para funcionar a una velocidad de combustión de, aproximadamente, 0,05 a, aproximadamente, 1 MMBtu/h, la geometría de la cámara de precombustión preferente tiene una L/D_h de mayor que 0 a, aproximadamente, 2, y funciona a un número de Reynolds de, aproximadamente, 200 a, aproximadamente, 22.000. En una realización en la que se ha conseguido el número de Reynolds deseado a estas velocidades de combustión, la anchura w de la tobera de combustible es de, aproximadamente, 1,905 a, aproximadamente, 7,62 cm (de, aproximadamente, 0,75 a, aproximadamente, 3 pulgadas) y, preferentemente de, aproximadamente, 2,54 cm a, aproximadamente, 5,08 cm (de, aproximadamente 1 a, aproximadamente, 2 pulgadas). En la realización, la proporción anchura/altura de la tobera de combustible es de, aproximadamente, 2 a, aproximadamente, 60 y, preferentemente de, aproximadamente, 5 a, aproximadamente, 30, la longitud L de la cámara de precombustión es de menos de, aproximadamente, 10,16 cm (aproximadamente 4 pulgadas) y, preferentemente, de, aproximadamente, 1,27 a, aproximadamente, 5,08 cm (de, aproximadamente 0,5 a, aproximadamente, 2 pulgadas). En la realización, la relación entre D_h en el extremo de la llama de la cámara de precombustión y D_h de las toberas de combustible y de oxidante es de, aproximadamente, 6 a, aproximadamente, 10 y, preferentemente de, aproximadamente, 6 a, aproximadamente, 8.

Tal como se ha discutido anteriormente, la extensión de los diseños de quemadores de velocidad de combustión rápida existentes, tal como los de las patentes '682 y '637, a aplicaciones de velocidad de combustión baja no es un problema sencillo. La figura 6 muestra la longitud de la cámara de precombustión normalizada según el diámetro hidráulico de la tobera de combustible, $D_{H\text{-}NG}$, en función de la velocidad de combustión relativa de quemadores más grandes, tales como los que se describen en las patentes '682 y '637 y el quemador diseñado utilizando los principios de diseño dados a conocer en la presente solicitud. El quemador dado a conocer actualmente se indica mediante los puntos de datos con rombos marcados como "real" a la izquierda del gráfico en la $L/D_{H\text{-}NG}$ de, aproximadamente, 10. La línea punteada representa la $L/D_{H\text{-}NG}$ extrapolada para quemadores diseñados utilizando reglas estándar de ampliación/reducción para hacer un quemador de oxígeno-combustible de llama plana de pequeña escala con escalonamiento de oxígeno, basado en los principios de diseño de quemadores más grandes, tales como los descritos en las patentes '682 y '637. El $L/D_{H\text{-}NG}$ real es, aproximadamente, un 60 % menor que el esperado según las reglas de diseño estándar. En general, en el presente quemador, la longitud de la cámara de precombustión normalizada según el diámetro hidráulico de la tobera de combustible ($L/D_{H\text{-}NG}$) es de, aproximadamente, 12 a, aproximadamente, 20.

Se ha demostrado que aumentar el número de Reynolds del flujo de oxígeno principal puede ayudar a reducir el riesgo de sobrecalentamiento del bloque del quemador, y esto se ha conseguido modificando las variables en la ecuación 1. Existen otras formas de aumentar el número de Reynolds del flujo de oxígeno principal que se pueden utilizar opcionalmente, además de las realizaciones descritas anteriormente. En particular, la capa límite del flujo de oxígeno (limitada por el paso de flujo mostrado en la figura 7) se puede energizar aplicando estratégicamente diversos disruptores de la capa límite.

En un ejemplo de disruptores de la capa límite, tal como los que se muestran en las figuras 8A y 8B, se puede formar un conjunto de geometrías cóncavas y/o convexas (entrantes y/o protuberancias) sobre la superficie interior de la tobera de oxígeno y/o la superficie exterior de la tobera de combustible, que son suficientemente pequeñas para no perturbar el núcleo central del flujo de oxígeno, dado que perturbar el flujo central podría inducir una mezcla incrementada entre las corrientes de combustible y de oxidante y sobrecalentar la cámara de precombustión o el bloque del quemador. Se pueden aplicar geometrías similares a la superficie exterior de la tobera de oxígeno y/o a la superficie interior de la tobera de combustible para minimizar la divergencia de velocidades entre las corrientes de combustible y de oxígeno. En particular, la introducción de entrantes/protuberancias en la superficie interior de la tobera de oxígeno permite una transición más precoz a una capa límite turbulenta entre las paredes interiores de la cámara de precombustión y la corriente de oxidante e incrementa la refrigeración convectiva de las paredes interiores de la cámara de precombustión sin incrementar la mezcla de las corrientes de combustible y de oxidante. La forma de las entrantes o protuberancias no está limitada a lo mostrado en las figuras 8A y 8B. Por ejemplo, las entrantes o protuberancias pueden ser escalonadas o no escalonadas, o pueden tener una sección transversal constante o variable a lo largo de la anchura de la tobera de combustible. En la realización de las figuras 9A y 9B, se utilizan trazas o ranuras indentadas a lo largo de la toda la anchura de la tobera. En la realización de las figuras 10A y 10B, se aplica una malla tejida o extruida a lo largo de las superficies de la tobera.

De forma alternativa o adicional a los disruptores de la capa límite en el paso de flujo de oxígeno, se pueden proporcionar disruptores de la capa límite similares sobre la superficie interior de la tobera de combustible para aumentar la turbulencia del combustible que fluye en el paso de flujo. Esto puede ser particularmente beneficioso cuando hay presentes disruptores de la capa límite en la superficie exterior de la tobera de combustible en el paso de oxidante, para ayudar a emparejar los perfiles de velocidad de la capa límite del combustible y del oxígeno, minimizando de este modo la divergencia y el retraso de la mezcla.

Tal como se muestra en la figura 11, suponiendo un perfil de velocidad turbulenta en el paso de combustible, una capa límite turbulenta en el paso de oxidante generará un menor diferencial/divergencia de velocidades en la interfase combustible-oxígeno, en comparación con la de una capa límite laminar, retrasando el inicio de la mezcla de las corrientes de combustible y de oxígeno, y reduciendo de ese modo el riesgo de sobrecalentamiento del bloque del quemador. Mientras tanto, una capa límite turbulenta se traducirá en un mayor número de Reynolds local cerca del límite, lo que aumentaría el coeficiente de transferencia de calor convectivo y, finalmente, ayudaría a reducir el riesgo de sobrecalentamiento en el bloque del quemador.

El flujo laminar en estado estacionario en el interior del paso del oxidante principal anular se puede caracterizar por un flujo de Poiseuille entre placas paralelas. El perfil de velocidad correspondiente u(z) a lo largo de la altura del paso se expresa como:

$$u(z) = \frac{1}{2\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\left(z^2 - \frac{c^2}{4}\right) \qquad \text{Ecuación 2}$$

donde μ representa la viscosidad dinámica del fluido, dp/dx es un gradiente de presión en la dirección de la corriente, z es la coordenada a lo largo de la altura del paso en la que z_{min}= - c/2 y z_{max} = + c/2. Sustituyendo los valores representativos para dp/dx, μ y c, y utilizando el espesor de capa límite definido por el requisito de que la velocidad del fluido paralela a la superficie sea igual al 99 % de la velocidad de la corriente libre, a cualquier velocidad de combustión dada, se puede calcular el espesor de la capa límite a lo largo de toda la longitud del paso de oxidante principal. Esto es particularmente útil para determinar la altura máxima de las entrantes/protuberancias utilizadas para energizar la capa límite. El criterio utilizado es que la altura característica máxima de las entrantes/protuberancias debe ser menor o igual que el grosor máximo de la capa límite. Para este quemador en particular, se calcula la altura máxima h, o dos veces el diámetro d_w, para que sea menor que el 21 %, preferentemente, menor que el 10 %, más preferentemente, entre el 0,1 % y el 5 % de la altura c del paso del oxidante anular.

Para las realizaciones de las figuras 8 y 9, las distancias en la dirección de la corriente (x) y transversal (y) entre dos entrantes o protuberancias consecutivas pueden ser $1d \leq x, y \leq 100d$, preferentemente $1d \leq x, y \leq 40d$, más preferentemente $2d \leq x, y \leq 10d$.

Para la realización de la figura 10, las distancias en la dirección de la corriente (x_w) y transversal (y_w) entre dos protuberancias consecutivas pueden ser $1d_w \leq x_w$, $y_w \leq 200d_w$, preferentemente $1d_w \leq x_w$, $y_w \leq 100d_w$, más preferentemente, $2\ d_w \leq x_w$, $y_w \leq 20d_w$.

En un ejemplo de un quemador con cámara de precombustión que utiliza uno o varios disruptores de la capa límite, se hizo funcionar un quemador con cámara de precombustión a una velocidad de combustión de 131,87 MJ/h (0,125 MBtu/h) con, aproximadamente, un 25 % del flujo oxidante pasando a través de la tobera del oxidante primaria, con un quemador que tiene disruptores de la capa límite en la forma de incisiones indentados en la superficie exterior de la tobera de combustible (tal como en la realización de la figura 9, pero solo sobre el lado de la tobera de combustible del paso de oxidante). Se consiguió un retraso en el sobrecalentamiento de, aproximadamente, 3 minutos en comparación con una cámara de precombustión acoplada con un quemador que funcionaba sin los disruptores de la capa límite. Cada incisión medía, aproximadamente, d = 0,01016 cm (0,004") de anchura y h =

0,00254 cm a 0,00381 cm (0,001" a 0,0015") de profundidad a lo largo de la superficie superior e inferior de la tobera de combustible a lo largo de, aproximadamente, dos tercios de su longitud. Dos incisiones consecutivos estaban, aproximadamente, a 0,1524 cm (0,060" pulgadas) de separación entre sí. Se debe observar que, en condiciones de funcionamiento más favorables, se espera que los disruptores de la capa límite puedan eliminar completamente el sobrecalentamiento.

La presente invención no está limitada en su alcance por los aspectos o realizaciones específicos dados a conocer en los ejemplos, que están destinados a ser ilustraciones de algunos aspectos de la invención y cualesquiera realizaciones que sean funcionalmente equivalentes están dentro del alcance de la presente invención. Diversas modificaciones de presente la invención, además de las mostradas y descritas en la presente memoria, serán evidentes para los expertos en la materia y se prevé que queden dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Quemador de oxígeno-combustible de llama plana que comprende:

una tobera de combustible gaseoso que tiene un extremo de salida, una anchura w, una altura a, un diámetro hidráulico $D_{h\text{-}NG}$, y una proporción anchura/altura w/a de, por lo menos 2, aproximadamente;

un conducto de oxidante principal situado concéntricamente alrededor de la tobera de combustible para formar una tobera del oxidante primaria de forma anular sustancialmente uniforme entre la tobera de combustible y el conducto de oxidante principal, teniendo el conducto de oxidante principal una altura b, teniendo la tobera de oxidante principal un extremo de salida alineado con el extremo de salida de la tobera de combustible; y

una cámara de precombustión que se extiende desde el extremo de salida de las toberas de combustible y de oxidante hasta un extremo de llama, teniendo la cámara de precombustión una longitud L, y un diámetro hidráulico D_h;

en el que la proporción L/D_h de la cámara de precombustión es mayor que 0 y menor o igual a 4, aproximadamente;

en el que la longitud de la cámara de precombustión normalizada según el diámetro hidráulico de la tobera de combustible $L/D_{h\text{-}NG}$ es mayor que 0 y menor o igual que 12, aproximadamente; y

caracterizado por que las dimensiones a, b y w están dimensionadas de tal manera que el oxidante principal tiene un número de Reynolds de, aproximadamente, 200 a, aproximadamente, 22.000 cuando el quemador se hace funcionar a una velocidad de combustión de, aproximadamente, 52,75 a, aproximadamente, 1.055 MJ/h (de, aproximadamente, 0,05 a, aproximadamente, 1 MMBtu/h).

2. Quemador de oxígeno-combustible, según la reivindicación 1, en el que la relación entre w y a es de, aproximadamente, 2 a, aproximadamente, 60.

3. Quemador de oxígeno-combustible, según la reivindicación 2, en el que la relación entre w y a es de, aproximadamente, 5 a, aproximadamente, 30.

4. Quemador de oxígeno-combustible, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la anchura w de la tobera de combustible es de, aproximadamente, 1,905 a, aproximadamente, 7,62 cm (de, aproximadamente, 0,75 a, aproximadamente, 3 pulgadas).

5. Quemador de oxígeno-combustible, según la reivindicación 4, en el que la anchura w de la tobera de combustible es de, aproximadamente, 2,54 a, aproximadamente, 5,08 cm (de, aproximadamente, 1 a, aproximadamente, 2 pulgadas).

6. Quemador de oxígeno-combustible, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la longitud L de la cámara de precombustión es mayor que 0 cm (0 pulgadas) y menor que, aproximadamente, 10,16 cm (aproximadamente, 4 pulgadas).

7. Quemador de oxígeno-combustible, según la reivindicación 6, en el que la longitud L de la cámara de precombustión es de, aproximadamente, 1,27 a, aproximadamente, 5,08 cm (de, aproximadamente, 0,5 a, aproximadamente, 2 pulgadas).

8. Quemador de oxígeno-combustible, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la cámara de precombustión tiene una geometría divergente y la relación entre el diámetro hidráulico en el extremo de la llama de la cámara de precombustión y el diámetro hidráulico de la tobera de combustible es de, aproximadamente, 6 a, aproximadamente, 10.

9. Quemador de oxígeno-combustible, según la reivindicación 8, en el que la cámara de precombustión tiene una geometría divergente y la relación entre el diámetro hidráulico en el extremo de la llama de la cámara de precombustión y el diámetro hidráulico de la tobera de combustible es de, aproximadamente, 6 a, aproximadamente, 8.

10. Quemador de oxígeno-combustible, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una tobera de oxidante escalonada separada del conducto de oxidante principal y en general paralela al mismo.

11. Quemador de oxígeno-combustible, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además disruptores de la capa límite situados a lo largo de, por lo menos, una parte de una pared de, por lo menos, una de la tobera de combustible y de la tobera de oxidante principal.

12. Quemador de oxígeno-combustible, según la reivindicación 11, en el que los disruptores de la capa límite se seleccionan del grupo que comprende: concavidades, entrantes, protuberancias, incisiones, ranuras, canales, mallas y combinaciones de los mismos.

13. Quemador de oxígeno-combustible, según la reivindicación 11 ó 12, en el que los disruptores de la capa límite están situados a lo largo de, por lo menos, una parte de la pared interior de la tobera de oxidante principal y están configurados para aumentar la turbulencia del oxidante que fluye en el paso del oxidante principal.

14. Quemador de oxígeno-combustible, según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, en el que los disruptores de la capa límite están situados a lo largo de, por lo menos, una parte de la pared exterior de la tobera de combustible y están configurados para aumentar la turbulencia del oxidante que fluye en el paso del oxidante principal.

15. Quemador de oxígeno-combustible, según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 14, en el que los disruptores de la capa límite están situados a lo largo de, por lo menos, una parte de la pared interior de la tobera de combustible y están configurados para aumentar la turbulencia del combustible que fluye en el paso del combustible.

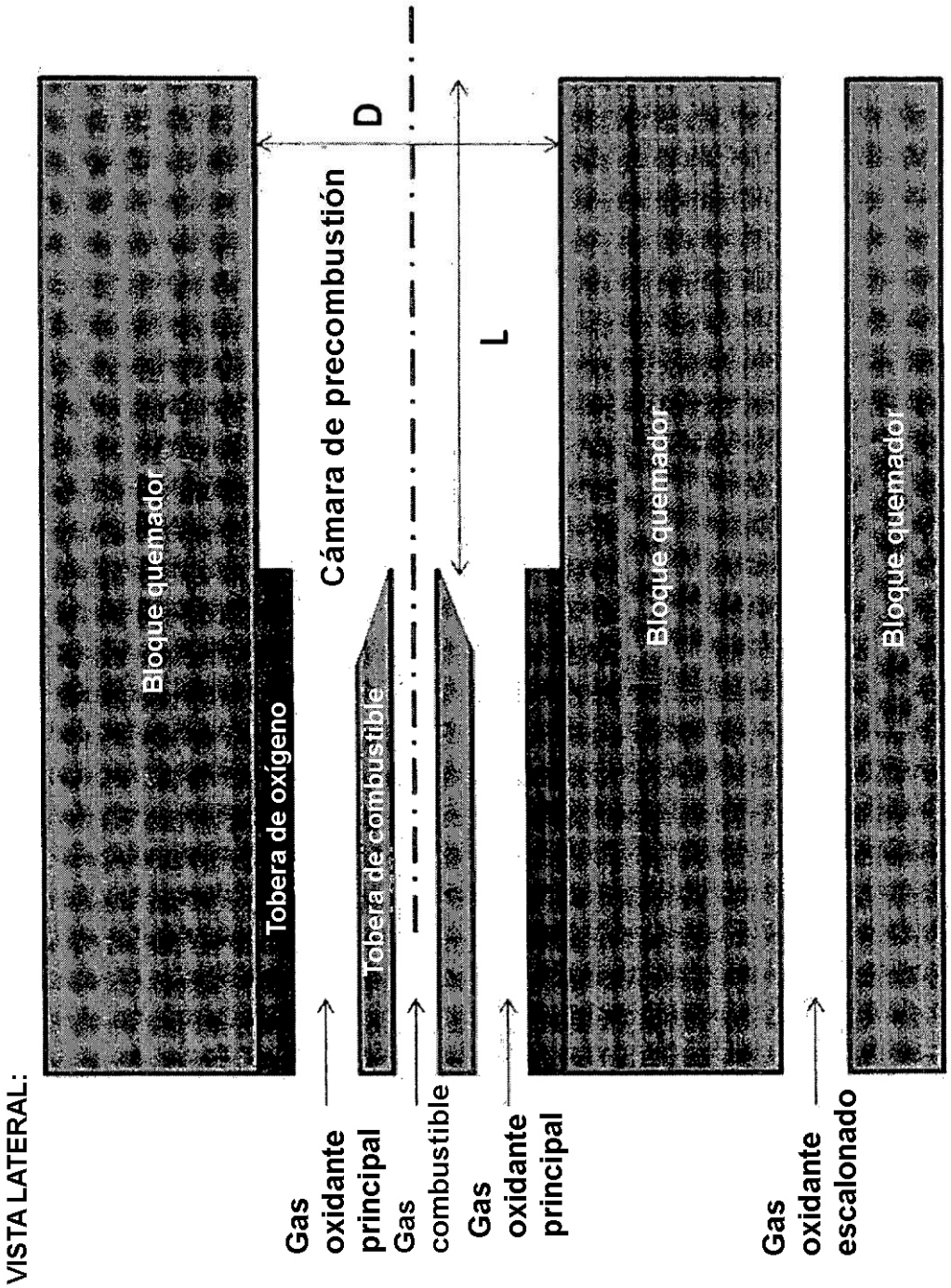

VISTA LATERAL:
Bloque quemador
Tobera de oxígeno
Cámara de precombustión
D
L
Tobera de combustible
Bloque quemador
Bloque quemador
Gas oxidante principal
Gas combustible
Gas oxidante principal
Gas oxidante escalonado

FIG. 1

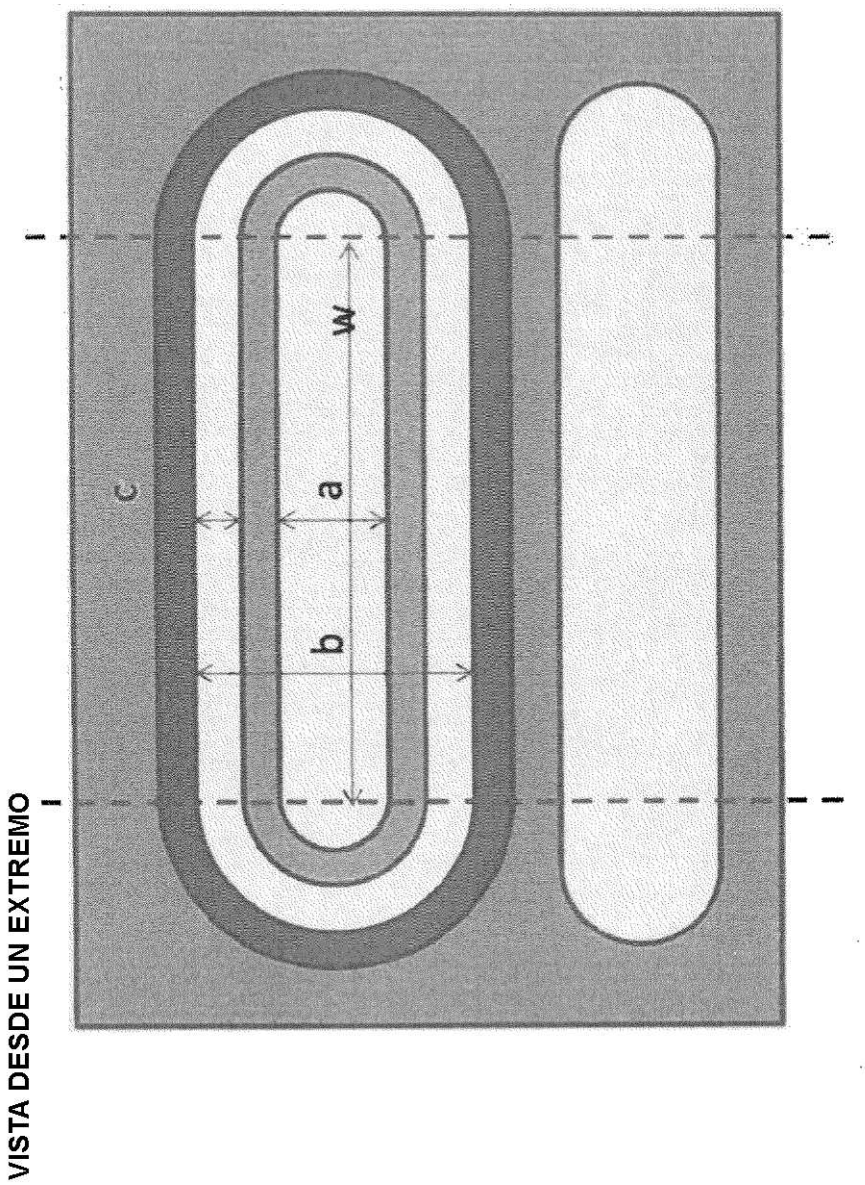


FIG. 2

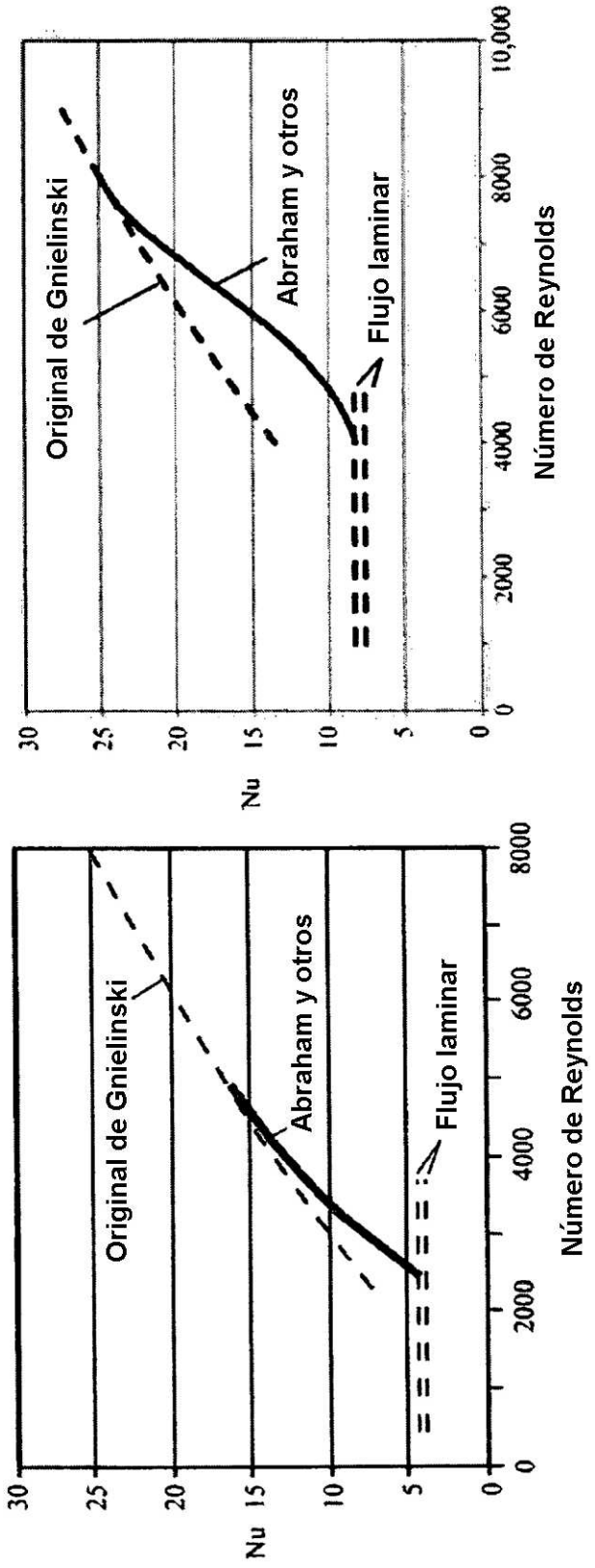

Original de Gnielinski
Abraham y otros
Flujo laminar
Nu
Número de Reynolds
0
5
10
15
20
25
30
2000
4000
6000
8000
10,000

FIG. 3

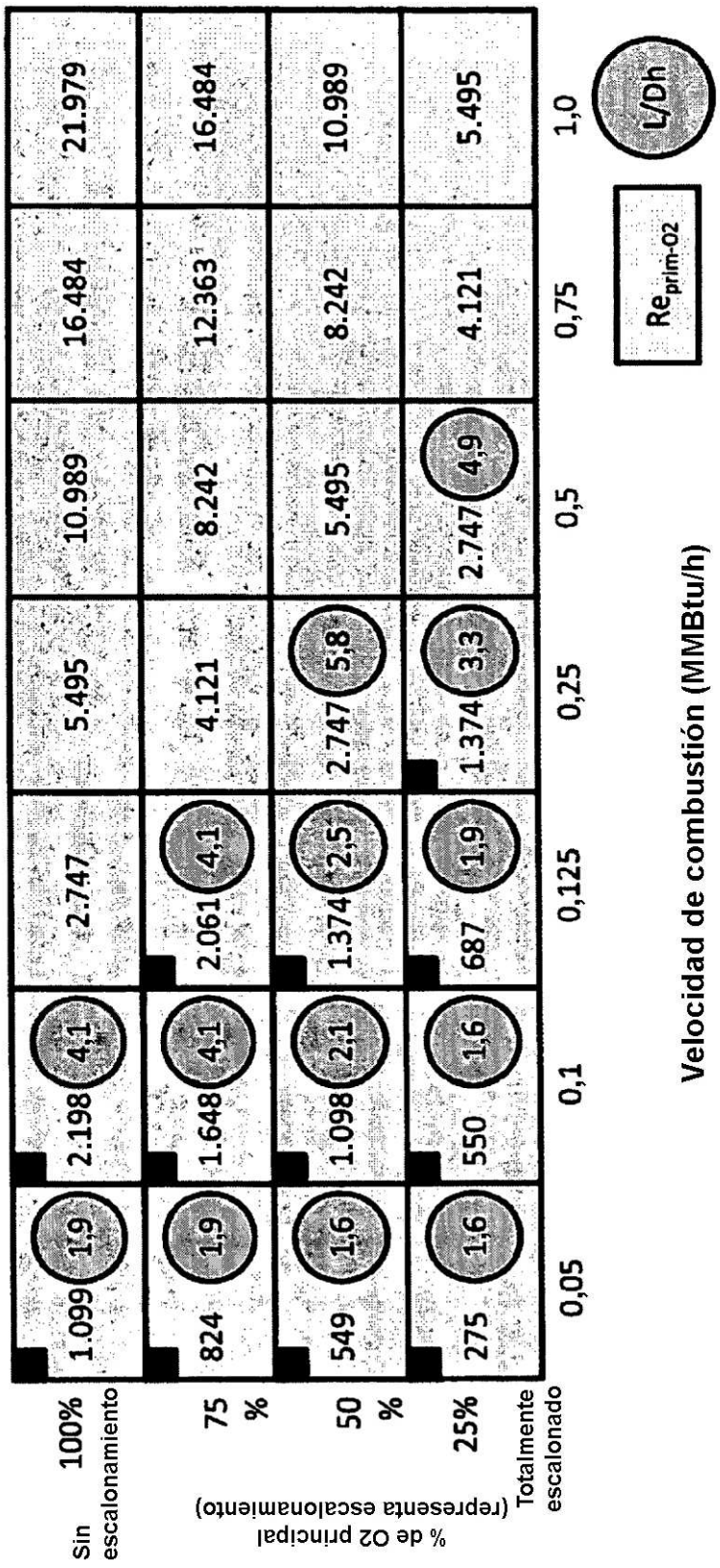

Sin escalonamiento
100%
75 %
50 %
25%
Totalmente escalonado
% de O2 principal (representa escalonamiento)
1.099
1,9
2.198
4,1
2.747
5.495
10.989
16.484
21.979
824
1,9
1.648
4,1
2.061
4,1
4.121
8.242
12.363
16.484
549
1,6
1.098
2,1
1.374
2,5
2.747
5,8
5.495
8.242
10.989
275
1,6
550
1,6
687
1,9
1.374
3,3
2.747
4,9
4.121
5.495
0,05
0,1
0,125
0,25
0,5
0,75
1,0
Velocidad de combustión (MMBtu/h)
$Re_{prim-O2}$
L/Dh

FIG. 4

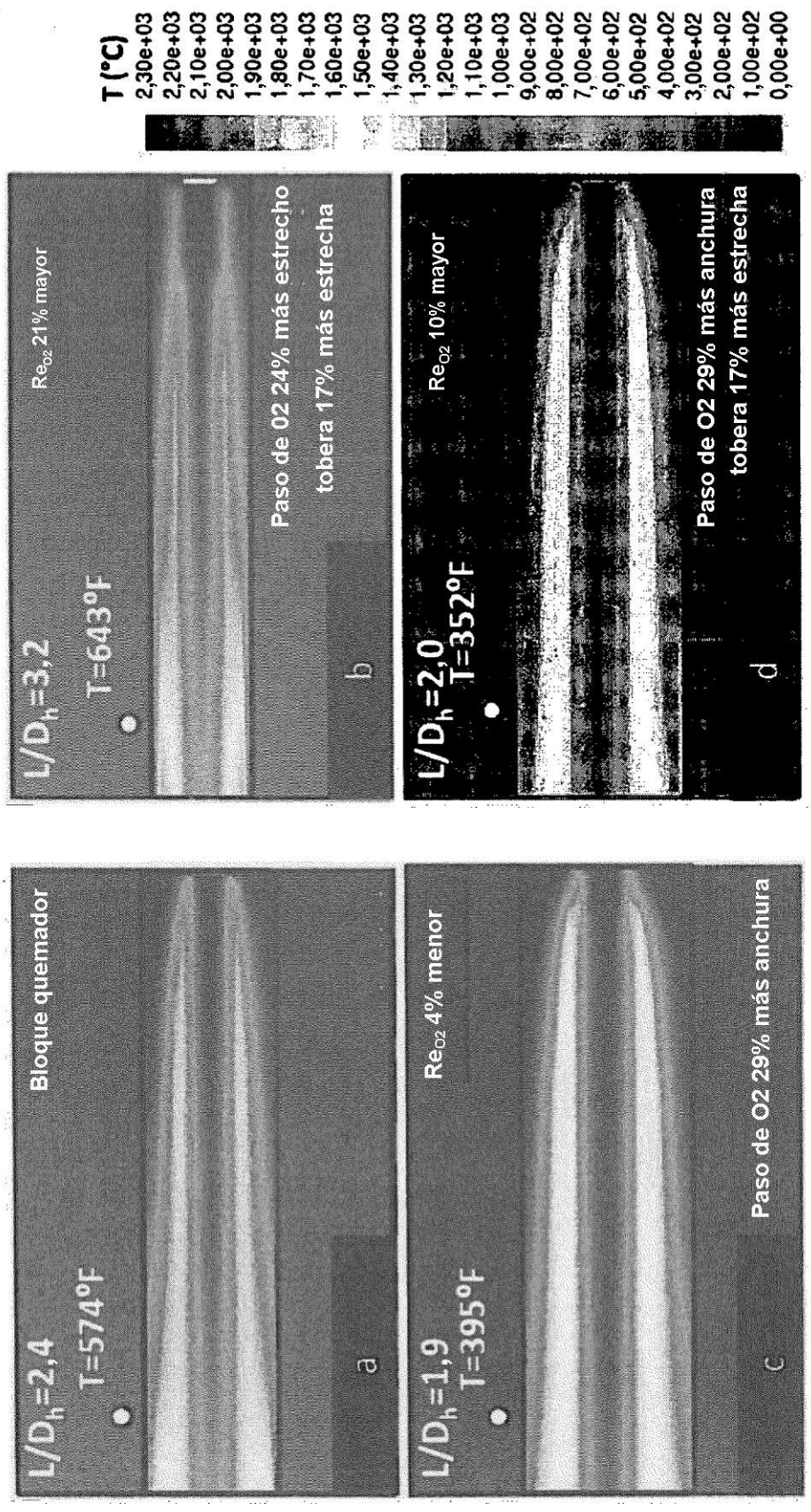

T (°C)
2,30e+03
2,20e+03
2,10e+03
2,00e+03
1,90e+03
1,80e+03
1,70e+03
1,60e+03
1,50e+03
1,40e+03
1,30e+03
1,20e+03
1,10e+03
1,00e+03
9,00e+02
8,00e+02
7,00e+02
6,00e+02
5,00e+02
4,00e+02
3,00e+02
2,00e+02
1,00e+02
0,00e+00
L/Dh=3,2
T=643°F
Reo2 21% mayor
Paso de 02 24% más estrecho
tobera 17% más estrecha
b
L/Dh=2,0
T=352°F
Reo2 10% mayor
Paso de O2 29% más anchura
tobera 17% más estrecha
d
Bloque quemador
L/Dh=2,4
T=574°F
a
Reo2 4% menor
L/Dh=1,9
T=395°F
Paso de O2 29% más anchura
c

FIG. 5

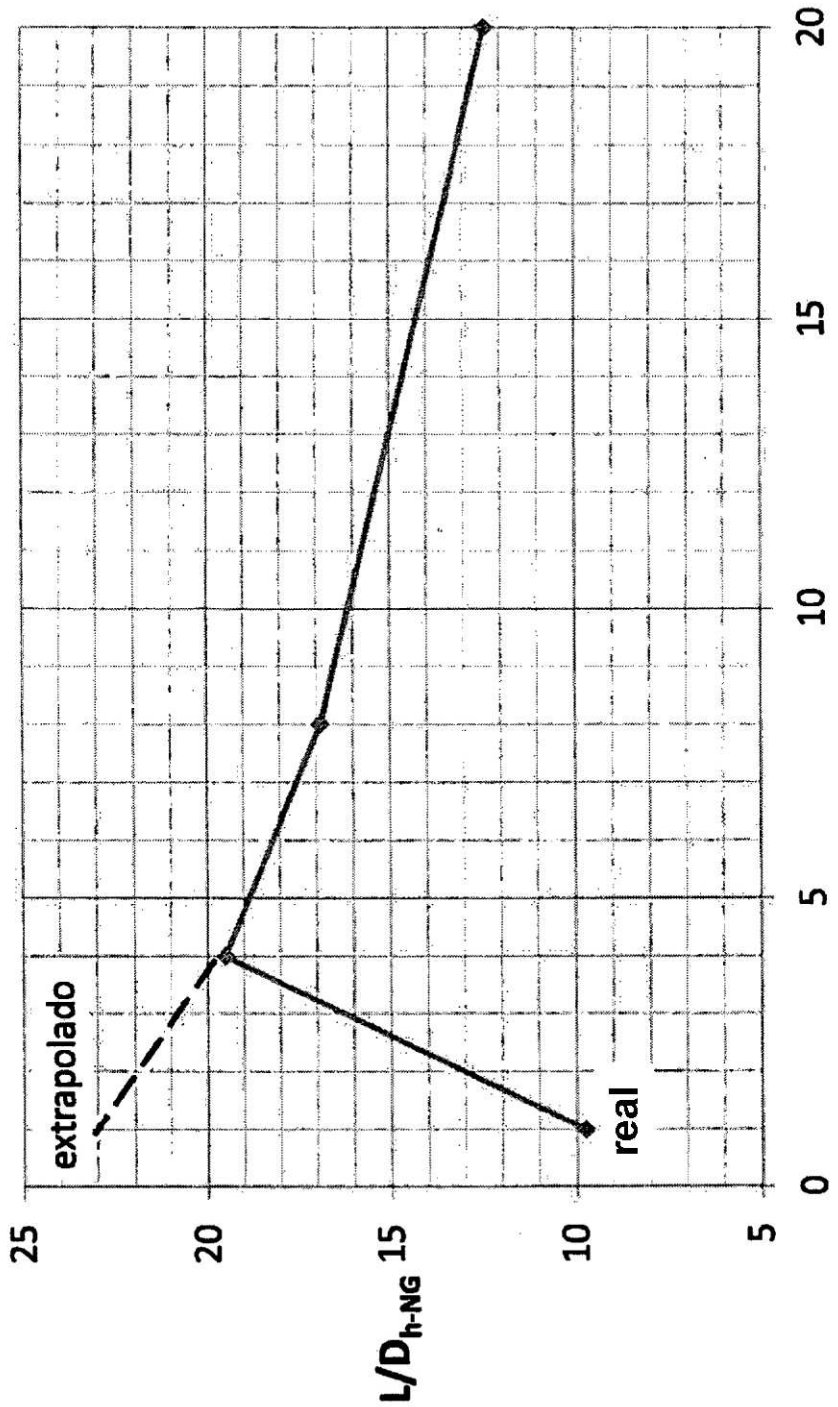

extrapolado
real
25
20
15
10
5
0
5
10
15
20
$L/D_{h\text{-}NG}$
Velocidad de combustión relativa

FIG. 6

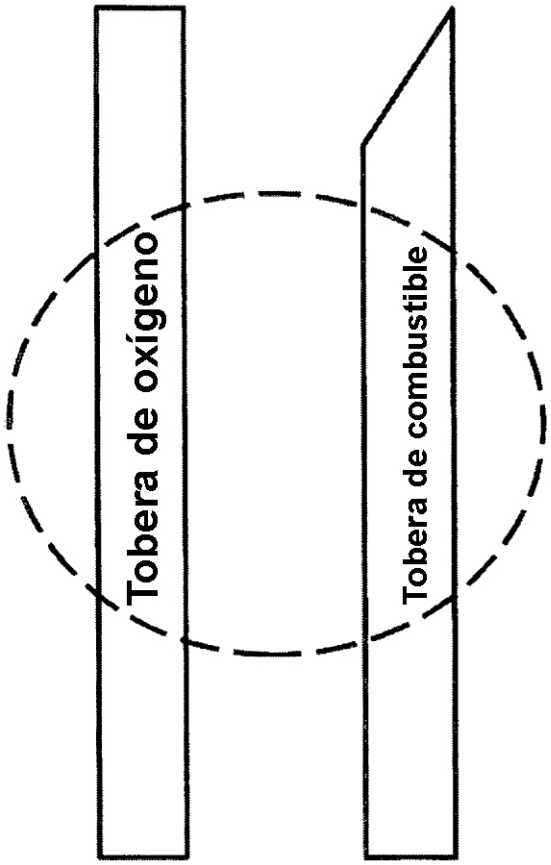


FIG. 7

FIG. 8A

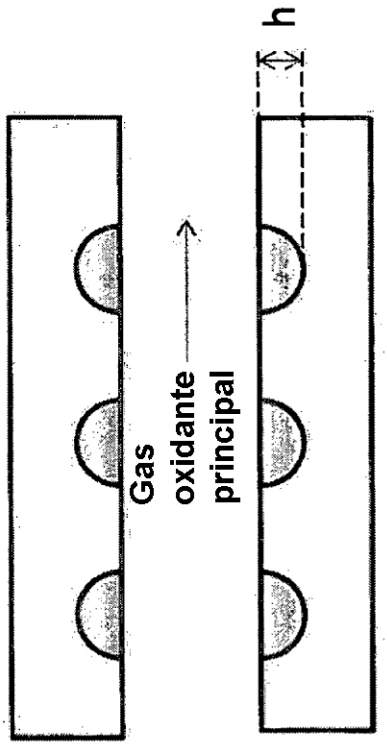


FIG. 8B

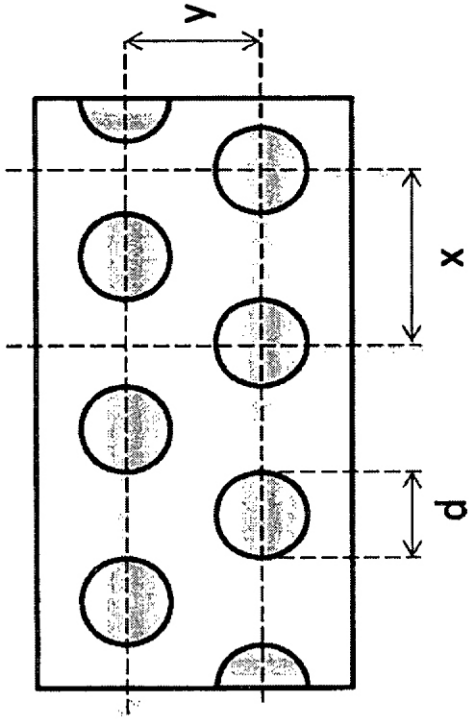


FIG. 9A

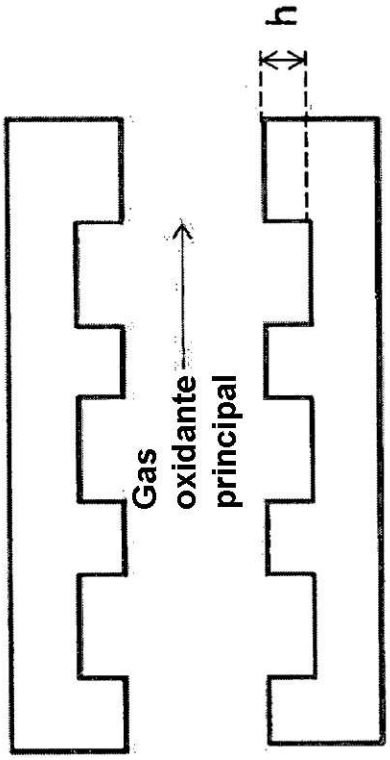


FIG. 9B

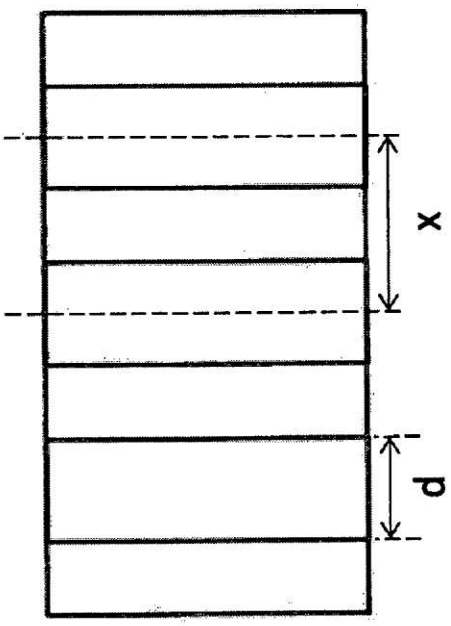


FIG. 10A

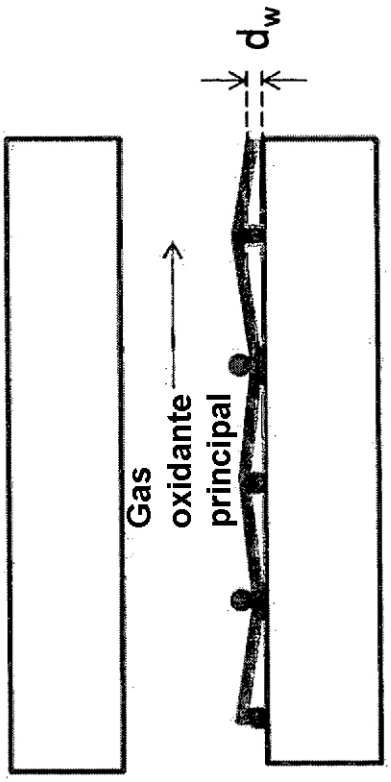
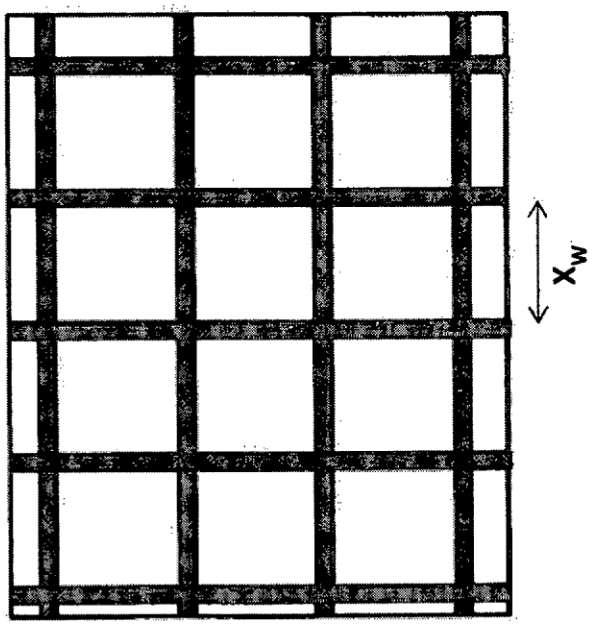


FIG. 10B



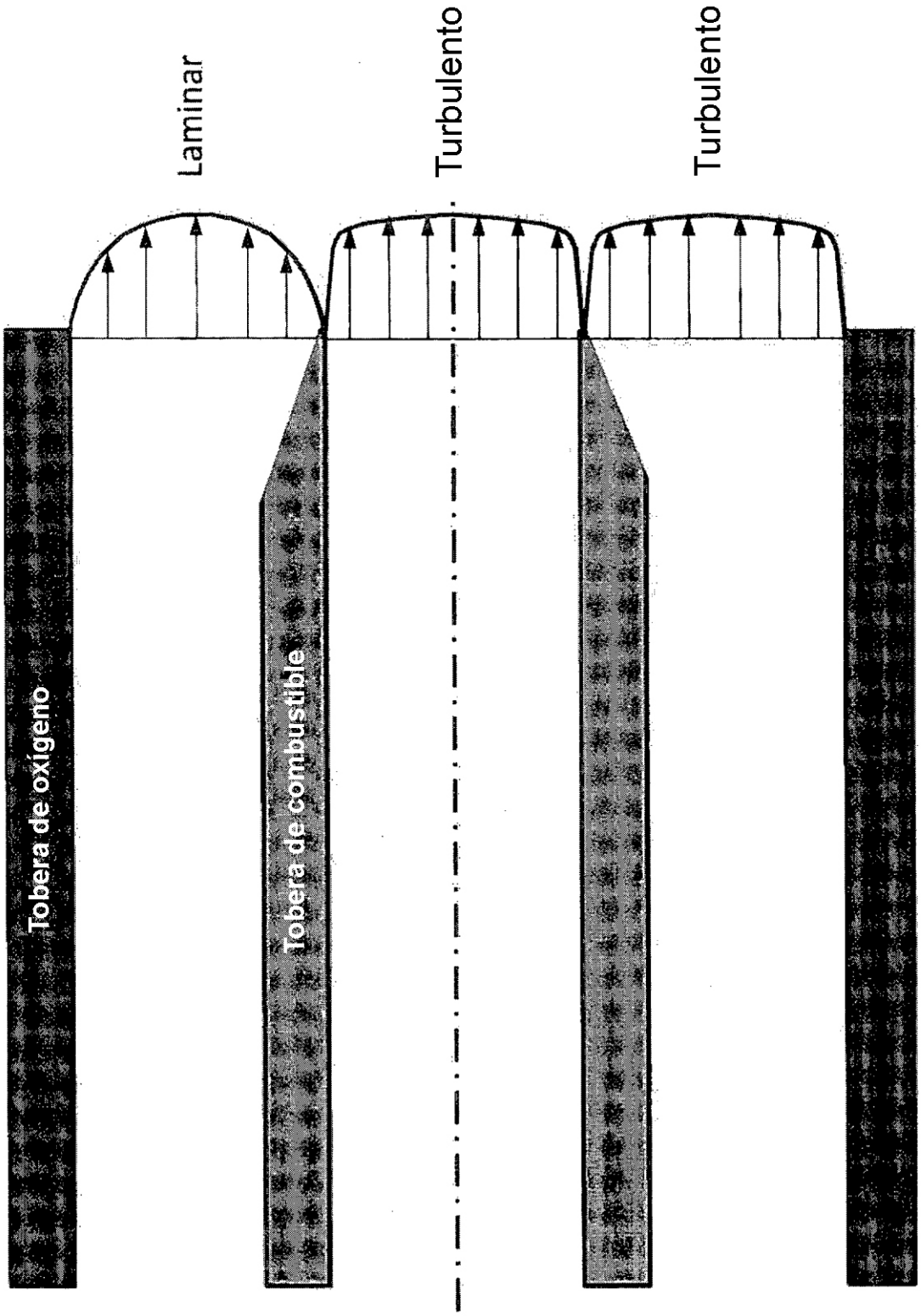

Laminar
Turbulento
Turbulento
Tobera de oxígeno
Tobera de combustible

FIG. 11