

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 381 543**

51 Int. Cl.:  
**F23D 14/58** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **04001245 .2**  
96 Fecha de presentación: **21.01.2004**  
97 Número de publicación de la solicitud: **1443271**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **04.08.2004**

54 Título: **Tobera de inyección ranurada y quemador de bajo NOx**

30 Prioridad:  
**29.01.2003 US 353683**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**29.05.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**29.05.2012**

73 Titular/es:  
**AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC.  
7201 HAMILTON BOULEVARD  
ALLENTOWN, PA 18195-1501, US**

72 Inventor/es:  
**Joshi, Mahendra Ladharam**

74 Agente/Representante:  
**Durán Moya, Luis Alfonso**

**ES 2 381 543 T3**

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

Tobera de inyección ranurada y quemador de bajo NO<sub>x</sub>

## 5 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Las toberas se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones para inyectar un fluido en otro fluido y favorecer la mezcla eficaz de los dos fluidos. Entre estas aplicaciones se incluyen, por ejemplo, sistemas de reactores químicos, quemadores industriales en hornos de proceso, inyectores de combustible en cámaras de combustión de turbinas de gas, toberas de escape de motores a reacción, inyectores de combustible en motores de combustión interna, e inyección de productos químicos o de gas en sistemas de tratamiento de aguas residuales. El objetivo de estas aplicaciones es el de promover la mezcla de vórtice y la dispersión rápida del fluido inyectado en el fluido circundante. Por lo general, es deseable lograr esta mezcla eficaz con una mínima caída de presión del fluido que se inyecta.

El diseño adecuado de las toberas de inyección para quemadores en hornos y calderas industriales es importante para maximizar la eficiencia de combustión y minimizar las emisiones de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). En particular, el endurecimiento de las regulaciones sobre las emisiones de NO<sub>x</sub> requiere de diseños de toberas y quemadores mejorados de alta eficiencia para todo tipo de combustibles utilizados en hornos y calderas industriales. Los quemadores en estas aplicaciones de combustión utilizan combustibles tales como el gas natural, propano, hidrógeno, gas de refinería, y otras combinaciones de gases combustibles de diferentes valores caloríficos. Se puede utilizar aire, aire precalentado, escapes de la turbina de gas, y/o aire enriquecido con oxígeno como los oxidantes en los quemadores.

Se pueden utilizar chorros turbulentos convencionales en una punta de tobera circular para arrastrar los gases de combustión secundarios o circundantes en un horno mediante un proceso típico de chorros de arrastre. La eficiencia de arrastre puede estar afectada por muchas variables, entre las que se incluyen el combustible principal y la proporción de inyección de oxidante o la presión de alimentación, proporción de flujo de fluido secundario o circundante, la flotabilidad del gas, la relación de la densidad del fluido primario y secundario, y la geometría de diseño de la tobera de combustible. Diseños eficaces de quemadores bajos en NO<sub>x</sub> requieren geometrías de punta de tobera que producen la máxima eficiencia de arrastre a una proporción de disparo dada o a presiones dadas de suministro de combustible y oxidante. Un mayor arrastre de gases del horno seguido de mezcla rápida entre el combustible, el gas oxidante y los gases de combustión producen temperaturas promedio de llama más bajas, lo que reduce la proporción de formación de NO<sub>x</sub> térmico. La mezcla mejorada en la ranura del horno puede reducir además los niveles de CO en los gases de combustión. Si la geometría del diseño de la tobera no está optimizada, la tobera puede requerir presiones de suministro de combustible y/o oxidante mucho más elevadas o mayores proporciones de gas promedio para lograr una mezcla adecuada en el horno y producir los niveles requeridos de emisiones de NO<sub>x</sub>.

En muchos procesos en la industria química, la presión de suministro de combustible está limitada debido a los procesos corriente arriba o corriente abajo. Por ejemplo, en la producción de hidrógeno o gas de síntesis a partir de gas natural por reformado de metano con vapor (SMR), un horno reactor de reformado operado con un combustible de gas natural primario produce un flujo de gas de síntesis crudo. Después de un desplazamiento opcional con vapor de agua para maximizar la conversión a hidrógeno, se utiliza un sistema de adsorción de presión oscilante (PSA) para recuperar el producto deseado de la salida de gas del reformador. El gas combustible residual del sistema de PSA, que normalmente se recupera a una presión baja, se recicla al reformador como combustible adicional o secundario. La recuperación de productos y la eficiencia de separación elevada en un sistema de PSA requiere que las etapas de descompresión y purga se produzcan a presiones cercanas a la atmosférica y, por lo general, estas presiones son lo más bajas posibles para maximizar la recuperación de producto. Por lo tanto, la mayoría de los sistemas de PSA producen habitualmente una corriente de gas residual de 136 a 156 KPa (5 a 8 psig) para reciclar al horno reformador. Después de un tanque de compensación para equalizar las fluctuaciones cíclicas de presión y el equipo necesario para el control de flujo de control de la ignición, la presión de suministro de los gases de escape disponibles como combustible secundario a los quemadores del horno reformador puede ser inferior a 122 KPa (3 psig).

Para un control eficiente en coste de las emisiones de NO<sub>x</sub> a partir de hornos de proceso SMR, los quemadores deben ser capaces de encenderse a estas presiones bajas de suministro de combustible secundario. Si los quemadores no pueden funcionar a estas presiones bajas, el combustible secundario debe ser comprimido, utilizando habitualmente compresores de propulsión eléctrica. Para plantas de hidrógeno grandes, el coste de esta compresión puede ser una parte importante de los costes operativos generales y, por lo tanto, es conveniente hacer funcionar los quemadores del horno reformador directamente con gas residual de PSA de baja presión como combustible secundario.

Algunos quemadores de baja emisión de NO<sub>x</sub> disponibles comercialmente utilizan métodos activos de control de mezcla, tales como aletas de tobera vibrantes motorizadas o válvulas oscilantes operadas por solenoide para producir zonas de combustión oscilantes ricas en combustible y/o pobres en combustible en la región de la llama. En

5 estos quemadores, se utiliza energía externa para aumentar la intensidad de turbulencia de los chorros de combustible y oxidante para mejorar las proporciones de mezcla. Sin embargo, estos métodos no pueden utilizarse en todos los diseños de quemadores de baja emisión de NO<sub>x</sub> o aplicaciones de calentamiento por falta de espacio del horno y consideraciones sobre el contorno de la llama. Entre otros métodos comunes de control de NO<sub>x</sub> se incluyen la dilución del gas de combustión con los gases de combustión recirculados o la inyección de vapor. Mediante la inyección de sustancias químicas no reactivas o inertes en la mezcla de combustible y oxidante, se reduce la temperatura promedio de la llama y, por lo tanto, se reducen las emisiones de NO<sub>x</sub>. Sin embargo, estos métodos requieren de tuberías y los costos adicionales asociados con el transporte de los gases de combustión, vapor u otros gases inertes. Además, hay una penalización energética debido al calentamiento necesario de los gases de dilución desde temperatura ambiente hasta la temperatura del proceso.

15 Es deseable que los nuevos diseños de quemadores de baja emisión de NO<sub>x</sub> utilicen técnicas rentables de mezcla pasiva para mejorar la economía del proceso. Estas técnicas pasivas utilizan la energía interna del fluido para mejorar la mezcla y no requieren de dispositivos que utilizan energía externa. Además, los nuevos quemadores de baja emisión de NO<sub>x</sub> deben ser diseñados para funcionar a presiones muy bajas de gas combustible. Las realizaciones de la presente invención, que se describen a continuación y se definen por las reivindicaciones que siguen, dan a conocer toberas y diseños de quemadores mejorados que reducen las emisiones de NO<sub>x</sub> a niveles muy bajos al tiempo que permiten la utilización de presiones muy bajas de gas de combustible.

20 El documento FR 2317592 se refiere al área de las instalaciones termo técnicas y más específicamente a los quemadores de gas. El quemador de gas permite la formación de pequeñas llamas de temperatura elevada debido a su tobera conformada con múltiples aberturas de tobera. El quemador de gas comprende un mezclador, una tobera conformada, un distribuidor de gas posicionado coaxialmente con el mezclador, y medios para transportar el gas y el aire al distribuidor y al mezclador de gas. La tobera conformada se coloca sobre el mezclador por el que sale la mezcla de aire-gas. La tobera conformada tiene aberturas de tobera conformadas como arcos posicionadas a lo largo de, como mínimo, dos anillos concéntricos, en los que las aberturas de tobera están inclinadas en comparación con el eje de simetría del quemador. El ángulo de inclinación de las aberturas de tobera aumenta progresivamente a medida que la abertura de la tobera se distancia del eje de simetría del quemador y se aproxima a la periferia de la tobera conformada.

30 El documento US 4790485 se refiere a un cabezal de pistola para pintura mediante polvo. El cabezal de pistola forma la sección frontal de una pistola de pintura de polvo electrostático que produce un perfil de fluido de polvo pulverizado fuera del cabezal de la pistola en una conformación plana de tipo abanico para disminuir la velocidad del flujo de polvo que viaja hacia la pieza que va a ser pintada. Una sección de pulverización de una pared de extremo de un cuerpo cilíndrico del cabezal de la pistola tiene un par de rendijas opuestas de modo que el espaciado entre estas rendijas disminuye progresivamente a medida que se aproxima a los extremos exteriores del cabezal de pistola.

40 El documento BE 442980 se refiere a un quemador, en el que en una de las realizaciones el quemador comprende tres filas de rendijas. La fila de en medio comprende dos rendijas separadas por un puente estrecho. Las rendijas de la fila del medio están desplazadas en comparación con las filas laterales.

#### CARACTERÍSTICAS DE LA INVENCION

45 La presente invención es un conjunto de quemador que comprende:

(a) un soporte central de llama que tiene medios de entrada para un gas oxidante, medios de entrada para un combustible primario, una región de combustión para quemar el gas oxidante y el combustible primario, y una salida para la descarga de un efluente primario desde el soporte de la llama, y

50 (b) una pluralidad de toberas inyectoras de combustible secundario que rodean la salida del soporte de llama central, en el que cada inyector de combustible secundario comprende

(1) un cuerpo de tobera que tiene una cara de entrada, una cara de salida, y un eje de flujo de entrada que pasa a través de las caras de entrada y salida, y

(2) una o más ranuras que se extienden a través del cuerpo de la tobera desde la cara de entrada hasta la cara de salida, teniendo cada ranura un eje de ranura y un plano central de ranura.

60 En un conjunto de quemador, según la presente invención, una de las varias realizaciones de tobera inyectora de combustible secundario comprende un cuerpo de tobera que tiene una cara de entrada, una cara de salida, y un eje de flujo de entrada que pasa a través de las caras de entrada y salida, y dos o más ranuras que se extienden a través del cuerpo de la tobera desde la cara de entrada hasta la cara de salida, teniendo cada ranura un eje de ranura y un plano central de ranura. El eje de ranura de, como mínimo, una de las ranuras no es paralelo al eje del flujo de entrada del cuerpo de la tobera. La tobera puede comprender además una tubería de entrada de tobera que tiene un primer extremo y un segundo extremo, en el que el primer extremo se une a la cara de entrada del cuerpo

de la tobera y está en comunicación de flujo de fluido con la misma. Los ejes de ranura de, como mínimo, dos ranuras en la tobera no pueden ser paralelos entre sí. La relación de la longitud axial de la ranura a la altura de la ranura puede estar entre, aproximadamente, 1 y, aproximadamente, 20.

5 Como mínimo, dos de las ranuras en la tobera pueden cruzarse entre sí. La tobera puede tener tres o más ranuras y una de las ranuras puede estar cruzada por cada una de las otras ranuras. En una configuración, la tobera tiene cuatro ranuras en las que una primera y una segunda ranura se cruzan entre sí y una tercera y una cuarta ranura se cruzan entre sí.

10 Otra realización de la tobera inyectora de combustible secundario comprende un cuerpo de tobera que tiene una cara de entrada, una cara de salida y un eje de flujo de entrada que pasa a través de las caras de entrada y salida, y dos o más ranuras que se extienden a través del cuerpo de la tobera desde la cara de entrada hasta la cara de salida, teniendo cada ranura un eje de ranura y un plano central de ranura. Ninguna de las ranuras se cruzan con otras ranuras y todas las ranuras están en comunicación de flujo de fluido con un conducto común de suministro de fluido. El plano central de, como mínimo, una ranura puede cruzar el eje del flujo de entrada.

15 Una realización alternativa de la tobera inyectora de combustible secundario comprende un cuerpo de tobera que tiene una cara de entrada, una cara de salida y un eje de flujo de entrada que pasa a través de las caras de entrada y salida, y dos o más ranuras que se extienden a través del cuerpo de la tobera desde la cara de entrada hasta la cara de salida, teniendo cada ranura un eje de ranura y un plano central de ranura. Una primera ranura de las dos o más ranuras puede estar cruzada por cada una de las otras ranuras y el plano central de ranura de, como mínimo, una de las ranuras puede cruzar el eje de flujo de entrada del cuerpo de la tobera. El plano central de la primera ranura puede cruzar el eje del flujo de entrada en un ángulo interior de entre 0 y, aproximadamente, 30 grados. El plano central de cualquiera de las otras ranuras puede cruzar el eje del flujo de entrada en un ángulo interior de entre 0 y, aproximadamente, 30 grados. Los planos centrales de las otras dos ranuras adyacentes pueden cruzarse en un ángulo interior de entre 0 y, aproximadamente, 15 grados. Las otras dos ranuras adyacentes pueden cruzarse en la cara de entrada del cuerpo de la tobera.

30 Cada tobera inyectora de combustible secundario del conjunto de quemador puede tener dos o más ranuras y los ejes de ranura de, como mínimo, dos ranuras pueden no ser paralelos entre sí. Cada tobera inyectora de combustible secundario puede tener dos o más ranuras y, como mínimo, dos de las ranuras pueden cruzarse entre sí. El cuerpo de la tobera puede tener cuatro ranuras, en las que una primera y una segunda ranura se entrecruzan entre sí, y en los que una tercera y una cuarta ranura se cruzan entre sí.

35 Alternativamente, el cuerpo de la tobera puede tener tres o más ranuras y una primera ranura puede estar cruzada por cada una de las otras ranuras. El plano central de la primera ranura puede cruzar el eje del flujo de entrada en un ángulo interior de entre 0 y, aproximadamente, 15 grados. El plano central de cualquiera de las otras ranuras puede cruzar el eje del flujo de entrada en un ángulo interior de entre 0 y, aproximadamente, 30 grados. Los planos centrales de las otras dos ranuras adyacentes pueden cruzarse en un ángulo interior entre 0 y 15 grados. Las dos ranuras adyacentes pueden cruzarse en la cara de entrada del cuerpo de la tobera.

La presente invención incluye además un proceso de combustión que comprende:

45 (a) dar a conocer un conjunto de quemador, que incluye:

(1) un soporte central de llama que tiene medios de entrada para un gas oxidante, medios de entrada para un combustible primario, una región de combustión para quemar el gas oxidante y el combustible primario, y una salida para la descarga de un efluente primario del soporte de la llama, y

50 (2) una pluralidad de toberas inyectoras de combustible secundario que rodea la salida del soporte de llama central, en el que cada inyector de combustible secundario comprende

(2a) un cuerpo de tobera que tiene una cara de entrada, una cara de salida, y un eje de flujo de entrada que pasa a través de las caras de entrada y salida; y

55 (2b) una o más ranuras que se extienden a través del cuerpo de la tobera desde la cara de entrada hasta la cara de salida, teniendo cada ranura un eje de ranura y un plano central de ranura.

60 (b) introducir el combustible primario y el gas oxidante en el soporte central de llama, quemar el combustible primario con una parte del gas oxidante en la región de combustión del soporte de la llama, y descargar un efluente primario que contiene los productos de la combustión y el exceso de gas oxidante desde la salida del soporte de la llama, y

(c) inyectar el combustible secundario a través de las toberas inyectoras de combustible secundario en el efluente primario desde la salida del soporte de la llama y quemar el combustible secundario con el exceso de gas oxidante.

65 El combustible primario y el combustible secundario pueden ser gases que tienen composiciones diferentes. En una

realización, el combustible primario puede ser gas natural y el combustible secundario puede comprender hidrógeno, metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono obtenido a partir de un sistema de adsorción de presión oscilante. El combustible secundario se puede introducir en las toberas inyectoras de combustible secundario a una presión menor de 122 KPa (3 psig). El combustible primario y el combustible secundario pueden ser gases que posean la misma composición.

#### BREVE DESCRIPCIÓN DE VARIAS VISTAS DE LOS DIBUJOS

Las realizaciones de la presente invención se ilustran con los siguientes dibujos, que no están necesariamente a escala.

La figura 1 es una vista isométrica de un conjunto de tobera y cuerpo de tobera, según una realización de la tobera inyectora de combustible secundario.

La figura 2 es un dibujo de corte axial del cuerpo de tobera de la figura 1.

La figura 3A es una vista en perspectiva frontal de la punta del cuerpo de la tobera de la figura 1.

La figura 3B es una vista en sección superior del cuerpo de tobera de la figura 1.

La figura 3C es una vista en sección lateral del cuerpo de tobera de la figura 1.

La figura 3D es una vista posterior de la punta del cuerpo de tobera de la figura 1.

La figura 4 es un dibujo isométrico de un conjunto de tobera y un cuerpo de tobera según una realización alternativa de la tobera inyectora de combustible secundario.

La figura 5A es una vista en perspectiva frontal del cuerpo de tobera de la figura 5.

La figura 5B es una vista en sección lateral del cuerpo de tobera de la figura 5.

La figura 5C es una vista en sección superior del cuerpo de tobera de la figura 5.

Las figuras 6A a 6F son vistas frontales esquemáticas de varias realizaciones del cuerpo de tobera.

Las figuras 7A a 7F son vistas frontales esquemáticas de realizaciones alternativas del cuerpo de tobera.

La figura 8 es una vista esquemática de un conjunto de quemador que utiliza inyectores secundarios, según una realización de la presente invención.

La figura 9 es una vista esquemática frontal del quemador de la figura 8.

Las figuras 10A a 10C muestran vistas representativas en sección lateral y una vista frontal de un montaje de tobera de quemador con orificios de inyección circulares.

La figura 11 muestra las dimensiones típicas de la tobera de las figuras 4, 5A, 5B, y 5C.

La figura 12 muestra las dimensiones típicas de la tobera de las figuras 1, 2, 3A, 3B, 3C y 3D.

La figura 13 es un gráfico de presión de combustible frente a la proporción de combustión en las realizaciones del quemador de la presente invención en comparación con la tobera circular de las figuras 10A a 10C.

La figura 14 es un gráfico de concentración de emisiones de NO<sub>x</sub> frente a la proporción de combustión para realizaciones del quemador de la presente invención en comparación con la tobera circular de las figuras 10A a 10C.

#### DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

Varias realizaciones de la tobera inyectora de combustible secundario incluyen una tobera o dispositivo de inyección de fluidos para la introducción de un fluido primario en un fluido secundario para promover la mezcla eficaz de los dos fluidos. Las realizaciones de la tobera se caracterizan por la utilización de ranuras orientadas para inyectar el fluido primario y promover la mezcla de vórtice rápida con el fluido secundario, mediante inestabilidades inducidas por el flujo corriente abajo y un nivel elevado de mezcla a pequeña escala y mezcla molecular entre los dos fluidos. La mezcla se puede lograr rápidamente a una distancia axial corta desde la salida de la tobera. Las realizaciones de la tobera pueden ser utilizadas en numerosas aplicaciones tales como, por ejemplo, sistemas de reactores químicos, quemadores industriales en hornos de proceso, inyectores de combustible en la combustión de turbinas de gas, toberas de escape de motores de reacción, inyectores de combustible en motores de combustión interna, e

inyección de productos químicos o de gas en sistemas de tratamiento de aguas residuales. Las toberas son particularmente útiles para la mezcla rápida de combustible, oxidante, y gases de combustión en hornos de proceso, calderas y otros sistemas de combustión.

5 Un ejemplo de realización de la tobera se ilustra en la figura 1. El conjunto de tobera -1- comprende un cuerpo de tobera -3- unido a la tubería -5- de entrada de la tobera. La ranura -7- se muestra en la presente realización orientada verticalmente, está atravesada por las ranuras -9-, -11-, -13- y -15-. Las ranuras están dispuestas entre la cara de salida -17- y una cara de entrada (no vista) en la conexión entre el cuerpo -3- de la tobera y la tubería -5- de entrada de la tobera. El fluido -19- fluye a través de la tubería -5- de entrada de la tobera a través de las ranuras -7-,  
10 -9-, -11-, -13- y -15-, y a continuación se mezcla con otro fluido que rodea las salidas de ranura. Además del perfil de ranura que se muestra en la figura 1, son posibles otros perfiles de ranura, tal como se describe más adelante, el montaje de la tobera se puede utilizar en cualquier orientación y no se limita a la orientación horizontal mostrada de forma general. Cuando se observan en una dirección perpendicular a la cara de salida -17-, las ranuras de ejemplo -9-, -11-, -13- y -15- cruzan la ranura -7- en ángulo recto. Otros ángulos de intersección son posibles entre las ranuras de ejemplo -9-, -11-, -13- y -15- y la ranura -7-. Cuando se observa en una dirección perpendicular a la cara de salida -17-, las ranuras de ejemplo -9-, -11-, -13- y -15- son paralelas entre sí, sin embargo, son posibles otras realizaciones en las que una o más de estas ranuras no son paralelas a las ranuras restantes.

20 Tal como se utiliza en la presente memoria descriptiva, el término "ranura" se define como una abertura a través de un cuerpo de tobera u otro material sólido en el que cualquier sección transversal de la ranura (es decir, una sección perpendicular al eje del flujo de entrada que se define más adelante) no es circular y se caracteriza por un eje mayor y un eje menor. El eje mayor es más largo que el eje menor y los dos ejes son generalmente perpendiculares. Por ejemplo, el eje de la sección transversal mayor de una ranura en la figura 1 se extiende entre los dos extremos de la sección transversal de la ranura, el eje de la sección transversal menor es perpendicular al eje mayor y se extiende  
25 entre los lados de la sección transversal de la ranura. La ranura puede tener una sección transversal de cualquier forma no circular y cada sección transversal se puede caracterizar por un punto central o centro de gravedad, en el que el centroide tiene la definición geométrica habitual.

30 Una ranura se puede caracterizar además por un eje de ranura que se define como una línea recta que une los centroides de todas las secciones transversales de la ranura. Además, una ranura puede caracterizarse o definirse por un plano central que cruza los principales ejes transversales de todas las secciones transversales de la ranura. Cada sección transversal de la ranura puede tener simetría perpendicular a cada lado de este plano central. El plano central se extiende más allá de cada extremo de la ranura y puede utilizarse para definir la orientación relativa de la ranura al eje del flujo de entrada del cuerpo de la tobera tal como se describe a continuación.

35 Se da la sección axial I-I de la tobera de la figura 1 en la figura 2. El eje del flujo de entrada -201- pasa por el centro de la tubería -5- de entrada de la tobera, la cara de entrada -203-, y la cara de salida -17-. En esta realización, los planos centrales de las ranuras -9-, -11-, -13- y -15- se encuentran en ángulo con el eje del flujo de entrada -201-, de tal manera que el fluido fluye desde las ranuras de la cara de salida -17- en direcciones divergentes desde el eje del flujo de entrada -201-. El plano central de la ranura -7- (sólo se ve una parte de esta ranura en la figura 2) se encuentra también en un ángulo con el eje del flujo de entrada -201-. Tal como se verá más adelante, esta característica de ejemplo dirige el fluido de la cara de salida de la tobera en otra dirección divergente desde el eje de entrada de flujo -201-. En esta realización de ejemplo, cuando se observa en una dirección perpendicular a la sección axial de la figura 2, las ranuras -9- y -11- se cruzan en la cara de entrada -203- para formar el borde afilado -205-, las ranuras -11- y -13- se cruzan para formar borde afilado -207-, y las ranuras -13- y -15- se cruzan para formar el borde afilado -209-. Estos bordes afilados permiten a las ranuras la separación aerodinámica del flujo y reducen la caída de presión asociada con los cuerpos no fuselados. Alternativamente, estas ranuras pueden cruzarse en un lugar axial entre la cara de entrada -203- y la cara de salida -17-, y los bordes afilados se formarían en el cuerpo -3- de la tobera. Alternativamente, estas ranuras se pueden no cruzar cuando se observan en una  
50 dirección perpendicular a la sección axial de la figura 2, y no se formarían bordes afilados.

55 El término "eje del flujo de entrada", tal como se utiliza en la presente memoria descriptiva, es un eje definido por la dirección del flujo de fluido que entra en la tobera en la cara de entrada, en el que este eje pasa a través de las caras de entrada y salida. Típicamente, pero no en todos los casos, el eje del flujo de entrada es perpendicular al centro de la cara de entrada de la tobera -205- y/o a la cara de salida de la tobera -17-, y llega a las caras de forma perpendicular. Cuando la tubería -5- de entrada de la tobera es un conducto cilíndrico típico, tal como el que se muestra, el eje del flujo de entrada puede ser paralelo o coincidente con el eje del conducto.

60 La longitud axial de la ranura se define como la longitud de una ranura entre la cara de entrada y la cara de salida de la tobera, por ejemplo, entre la cara de entrada -203- y la cara de salida -17- de la figura 2. La altura de la ranura se define como la distancia perpendicular entre las paredes de la ranura en el eje de sección transversal menor. La relación de la longitud axial de ranura a la altura de ranura puede estar entre 1 y 20.

65 Las ranuras múltiples en un cuerpo de tobera pueden cruzarse en un plano perpendicular al eje del flujo de entrada. Tal como se muestra en la figura 1, por ejemplo, las ranuras -9-, -11-, -13- y -15- cruzan la ranura -7- en ángulo recto. Si se desea, estas ranuras pueden cruzarse en un plano perpendicular al eje del flujo de entrada en ángulos

distintos a los ángulos rectos. Además, las ranuras adyacentes se cruzan cuando se observan en un plano paralelo al eje del flujo de entrada, es decir, el plano de sección de la figura 2. Tal como se muestra en la figura 2, por ejemplo, las ranuras -9- y -11- se cruzan en la cara de entrada -203-, para formar un borde afilado -203- tal como se ha descrito anteriormente. Si se desea, se pueden variar las relaciones angulares entre los planos centrales de las ranuras y, además, entre el plano central de cada ranura y el eje del flujo de entrada. Esto permite que el fluido se descargue desde la tobera en cualquier dirección seleccionada con respecto al eje de la tobera.

Se dan en las figuras 3A a 3D vista adicionales del cuerpo de tobera de ejemplo -3-. La figura 3A es una vista en perspectiva frontal del cuerpo de la tobera; la figura 3B es una vista de la sección II-II de la figura 3A, e ilustra los ángulos formados entre los planos centrales de las ranuras y el eje del flujo de entrada. El ángulo  $\alpha_1$  se forma entre el plano central de la ranura -15- y eje del flujo de entrada -201- y el ángulo  $\alpha_2$  se forma entre el plano central de la ranura -9- y eje flujo de entrada -201-. Los ángulos  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  pueden ser iguales o diferentes, y pueden estar en el intervalo de 0 a, aproximadamente, 30 grados. El ángulo  $\alpha_3$  se forma entre el plano central de la ranura -11- y eje del flujo de entrada -201- y el ángulo  $\alpha_4$  se forma entre el plano central de la ranura -13- y el eje del flujo de entrada -201-. Los ángulos  $\alpha_3$  y  $\alpha_4$  pueden ser iguales o diferentes, y pueden estar en el intervalo de 0 a, aproximadamente, 30 grados. Los planos centrales de cualquiera de las otras dos ranuras adyacentes se pueden cruzar en un ángulo interior de entre 0 y, aproximadamente, 15 grados.

La figura 3C es una vista de la sección III-III de la figura 3A, que ilustra el ángulo  $\beta_1$  formado entre el plano central de la ranura -7- y el eje del flujo de entrada -201-. El ángulo  $\beta_1$  puede estar en el intervalo de 0 a, aproximadamente, 30 grados. Los bordes exteriores de la ranura -11- (así como las ranuras -9-, -13- y -15-) pueden ser paralelos al plano central de la ranura -7-.

La figura 3D es un dibujo en perspectiva trasera del cuerpo de la tobera de la figura 1, que da otra visión de los bordes afilados -205-, -207-, -209- formados por las intersecciones de las ranuras -9-, -11-, -13- y 15-.

Otra realización de la tobera se ilustra en la figura 4, en la que las ranuras en el cuerpo de la tobera -401- se disponen en forma de dos crucetas -403- y -405-. Se muestra en la figura 5A una vista en perspectiva frontal del cuerpo de la tobera, en el que la cruceta -403- está formada por las ranuras -507- y -509- y la cruceta -405- está formada por las ranuras -511- y -513-. Una vista de la sección IV-IV de la figura 5A muestra los planos centrales de las ranuras -509- y -511- divergentes respecto al eje de entrada del flujo -515- por los ángulos  $\alpha_5$  y  $\alpha_6$ . Los ángulos  $\alpha_5$  y  $\alpha_6$  pueden ser iguales o diferentes y pueden estar en el intervalo de 0 a, aproximadamente, 30 grados. Los bordes exteriores de la ranura -507- pueden ser paralelos al plano central de la ranura -509- y los bordes exteriores de la ranura -513- pueden ser paralelos al plano central de la ranura -511-. En esta realización, las ranuras -507- y -511- se cruzan para formar el borde afilado -512-.

Se muestra en la figura 5C una vista de la sección V-V de la figura 5A, que ilustra cómo el plano central de la ranura -513- se aleja del eje de entrada de flujo -515- por ángulo formado  $\beta_2$ , que puede estar en el intervalo de 0 a, aproximadamente, 30 grados. Los bordes exteriores de la ranura -511- pueden ser paralelos al plano central de la ranura -513-.

Tal como se ha descrito anteriormente, las ranuras pueden cruzarse con otras ranuras en una o ambas configuraciones. En primer lugar, las ranuras pueden cruzarse cuando se observan en una vista perpendicular a la cara de salida de la tobera del cuerpo (véase, por ejemplo, las figuras 3A o 5A) o cuando se observan en una sección transversal de la ranura (es decir, una sección perpendicular al eje del flujo de entrada entre la cara de entrada y la cara de salida). En segundo lugar, las ranuras adyacentes pueden cruzarse cuando se observan en una sección tomada en paralelo al eje del flujo de entrada (véase, por ejemplo, las figuras 2, 3B y 5B). Por definición, una intersección de dos ranuras se produce cuando un plano tangente a una pared de una ranura cruza un plano tangente a una pared de una ranura adyacente de manera que la intersección de los dos planos se encuentra entre la cara de entrada y la cara de salida de la tobera, en la cara de entrada, y/o en la cara de salida. Por ejemplo, en la figura 2, un plano tangente a una pared de la ranura -9- se cruza con un plano tangente a una pared de la ranura -7- y la intersección de los dos planos se encuentra entre la cara de entrada -203- y la cara de salida -17-. Un plano tangente a la pared superior de la ranura -9- y un plano tangente a la pared inferior de la ranura -11- se cruzan en el borde -205- de la cara de entrada -203-. En otro ejemplo, en la figura 5B, un plano tangente a la pared superior de la ranura -513- y un plano tangente a la pared inferior de la ranura -507- se cruzan en el borde -512- entre las dos caras de la tobera.

Cada una de las ranuras de los ejemplos de las realizaciones descritas anteriormente tiene generalmente paredes internas planas y paralelas. Son posibles otras realizaciones en las que las paredes planas de una ranura pueden converger o divergir entre sí en la dirección del flujo de fluido. En otras realizaciones, las paredes de la ranura pueden ser curvas en vez de planas.

Cada una de las ranuras de los ejemplos de las realizaciones descritas anteriormente tiene generalmente una sección rectangular con los lados rectos y extremos curvos. Son posibles otras realizaciones que utilizan ranuras con otras formas de sección transversal, tal como las que se ilustran en las figuras 6A a 6F. Las figuras 6A, 6B, 6C

muestran configuraciones de ejemplo con ranuras que se cruzan que tienen sección ovalada, triangular, y rectangular, respectivamente, tal como se observa en una vista frontal de la cara de salida de un cuerpo de tobera. Las figuras 6D, E y F muestran las configuraciones de ejemplo con múltiples ranuras que se cruzan con forma rectangular, en forma de pico, y ovalado plano, respectivamente, como se ve en una vista frontal de la cara de salida de un cuerpo de tobera.

Se puede prever otras configuraciones de ranuras que se cruzan, siempre y cuando cada ranura tenga una sección transversal no circular y se pueda caracterizar por un eje de ranura y un plano central de ranura, tal como se ha definido anteriormente. Por ejemplo, dos ranuras pueden cruzarse en los extremos en una configuración en forma de compás o en forma de V. Múltiples ranuras pueden formar varios compases que se cruzan en una configuración de diente de sierra o de zig-zag.

En las realizaciones descritas anteriormente en referencia a las figuras 1 a 6, las aberturas de tobera están formadas por varias ranuras que se cruzan cuando se observan en una vista frontal de la cara de salida del cuerpo de la tobera (por ejemplo, véase la figura 3A). Son posibles realizaciones alternativas de la tobera en las que las múltiples ranuras no se cruzan cuando se observan en una vista frontal de la cara de salida del cuerpo de la tobera. Varias de estas realizaciones son ilustradas por las vistas de la cara de salida del cuerpo de la tobera de las ranuras en las figuras 7A a 7F, que muestran múltiples ranuras separadas con secciones transversales ovales aplanadas, triangulares, rectangulares, y en forma de punta. Los planos centrales de una o más de estas ranuras pueden ser paralelos al eje del flujo de entrada del cuerpo de la tobera o, alternativamente, los planos centrales de una o más de estas ranuras pueden cruzar el eje del flujo de entrada del cuerpo de la tobera. Algunas de estas ranuras pueden cruzarse entre sí cuando se observan en una sección paralela al eje del flujo de entrada de una forma análoga a las ranuras de la figura 3B. En las realizaciones de las figuras 7A a 7F, el suministro de fluido a todas las ranuras normalmente se proporciona desde un conducto o cámara de suministro de fluido común.

Muchas de las aplicaciones de las toberas descritas anteriormente, pueden utilizar un cuerpo de tobera que está unido axialmente a una tubería cilíndrica, tal como se ilustra en las figuras 1 a 5. Otras aplicaciones son posibles, por ejemplo, en la que varios cuerpos de tobera se instalan en las paredes de un colector o cámara que proporciona un suministro de fluido común a los cuerpos de tobera. Es posible además, y se considera una realización de la tobera, fabricar un colector o cámara de tobera integrado en el que las ranuras de la tobera se cortan directamente en las paredes del colector o cámara. En una realización de este tipo, la función de los cuerpos de tobera, tal como el que se ha descrito anteriormente, estaría proporcionado por la sección de la pared del colector que rodea un grupo de ranuras que forma una tobera individual.

Las toberas con ranura descritas anteriormente proporcionan un alto grado de mezcla utilizando nuevas geometrías de punta de tobera que tienen ranuras múltiples o que se cruzan creando intensos vórtices o estructuras de vórtice axiales tridimensionales y circunferenciales. La interacción de estos vórtices con las inestabilidades de chorro provoca una mezcla rápida entre los fluidos primario y secundario. La mezcla se puede lograr a una caída de presión del fluido inyectado relativamente baja y se puede completar en una distancia axial relativamente corta desde la descarga de la tobera. La utilización de estas toberas con ranuras ofrece una alternativa a los métodos activos de control de mezcla, tales como aumentar la presión de suministro de fluido o utilizar aletas de tobera vibratorias motorizadas o válvulas oscilantes operadas por solenoide, para favorecer la mezcla de fluido inyectado primario con el fluido secundario circundante.

Las toberas con ranuras descritas anteriormente pueden ser fabricadas a partir de metales u otros materiales adecuados para la temperatura y atmósfera reactiva previstas en cada aplicación. Cuando se utilizan en aplicaciones de combustión, por ejemplo, las toberas con ranuras pueden ser de acero inoxidable de tipo 304 ó 316.

Las toberas con ranuras descritas anteriormente pueden utilizarse en sistemas de combustión para la inyección de combustible en los gases de combustión con mezcla de alta eficacia. Un ejemplo de ilustración en sección de un sistema quemador de ejemplo con toberas con ranuras se da en la figura 8, que muestra un quemador central o soporte de llama rodeado de múltiples toberas con ranuras (que puede definirse como montaje de toberas) para la inyección de combustible secundario. El quemador central o soporte de llama -801- comprende una tubería exterior -803-, una tubería concéntrica intermedia -805-, y una tubería concéntrica interior -807-. La parte interna de la tubería interior -807- y el espacio anular -809- entre la tubería exterior -803- y la tubería intermedia-805- se encuentran en comunicación de flujo con el interior de la tubería exterior -803-. El espacio anular -811- entre la tubería interior -807- y la tubería intermedia -805- está conectado a la tubería de entrada de combustible -813- y en comunicación de flujo con la misma. El quemador central se instala en la pared del horno -814-.

En el funcionamiento de este quemador central, el gas oxidante (normalmente aire o aire enriquecido con oxígeno) -815- fluye en el interior de la tubería exterior -803-, una parte de este aire fluye por el interior de la tubería interior -807-, y la parte restante de este aire pasa a través del espacio anular -809-. El combustible primario -816- fluye a través de la tubería -813- y a través del espacio anular -811-, y se quema inicialmente en la zona de combustión -817- con el aire de la tubería interior -807-. Los gases de combustión de la zona de combustión -817- se mezclan con el aire adicional en la zona de combustión -819-. La combustión en esta zona es típicamente muy pobre en combustible. Típicamente, se forma una llama visible en la zona de combustión -819- y en la zona de combustión

-821- a medida que los gases de combustión -823- entran en el interior del horno -825-.

Un sistema de combustible secundario comprende una tubería de entrada -827-, colector -829-, y una pluralidad de tuberías de inyección de combustible secundarias -831-. Los extremos de las tuberías de inyección de combustible secundarias están equipados con toberas de inyección con ranuras -833- similares a las descritas anteriormente, por ejemplo, en las figuras 1-3. El combustible secundario -835- fluye a través de la tubería de entrada -827-, el colector -829-, y las tuberías de inyección de combustible secundario -831-. Las corrientes de combustible secundario -837- desde las toberas -833- se mezclan rápidamente y se queman con los gases de combustión que contienen oxidantes -823-. Los gases de combustión más fríos en el interior del horno -825- son rápidamente arrastrados por las corrientes de combustible secundario -837- por la acción de mezcla intensa promovida por las toberas con ranuras -833-, y el combustible secundario se quema con los gases de combustión que contienen oxidante corriente abajo de la salida del quemador central -801-. El combustible primario puede ser del 5 al 30% del caudal de combustible total (primario más secundario) y el combustible secundario puede ser del 70 al 95% del caudal de combustible total.

La figura 9 es una vista en planta que muestra el extremo de descarga del aparato de ejemplo de la figura 8. Las tuberías concéntricas -803-, -805-, -807- y los espacios anulares cerrados -809- y -811- que están dotados de miembros radiales o aletas. Las toberas con ranuras de inyección de combustible secundario -833- (descritas anteriormente) pueden disponerse de forma concéntrica alrededor del quemador central, tal como se muestra. En esta realización, los ángulos de ranura de las toberas de inyección con ranuras están orientados para dirigir el combustible secundario inyectado en direcciones divergentes con respecto al eje del quemador central -801-.

Otros tipos de toberas con ranuras pueden ser dispuestos alrededor del quemador central para la inyección de combustible secundario. Los cuerpos de toberas de estas toberas pueden utilizar una o más ranuras que se extienden a través del cuerpo de la tobera desde la cara de entrada a la cara de salida, y cada una de estas ranuras pueden estar caracterizadas por un eje de ranura y un plano central de ranura, tal como se ha definido anteriormente. Cada tobera inyectora de combustible secundario puede tener dos o más ranuras y los ejes de ranura de, como mínimo, dos ranuras pueden no ser paralelos entre sí. Alternativamente, cada tobera inyectora de combustible secundario puede tener dos o más ranuras y, como mínimo, dos de las ranuras pueden cruzarse entre sí.

## EJEMPLO

Se hizo funcionar un horno de ensayos de combustión que utiliza el conjunto de quemador de las figuras 8 y 9 para comparar el rendimiento de las toberas de las figuras 1 y 4 con una configuración de tobera circular ilustrada en las figuras 10A, 10B, y 10C. Estas toberas se pueden definir como un montaje de toberas que proporcionan combustible secundario a una segunda etapa de combustión, en la que el combustible para la primera etapa de combustión se proporciona por el combustible -815- a través de la tubería de -813- de la figura 8.

El horno de ensayo tenía 1,8 metros por 1,8 metros (6 pies por 6 pies) en la sección transversal y 5,2 metros (17 pies) de largo, tenía un quemador de combustión en un extremo, y tenía una salida para los productos de la combustión en el otro extremo. La salida se conectó a una chimenea equipada con un amortiguador para el control de la presión del horno. El interior del horno estaba forrado con material refractario de alta temperatura y se tenía paneles enfriados por agua para simular la carga del horno. El horno de ensayo se hizo funcionar en el intervalo de 878 a 1757 KW (3 a 6 MMBTU/h) utilizando gas natural para el combustible primario y el combustible secundario (estable). El caudal de gas natural se varió entre 80,4 N·m<sup>3</sup>/h (3000 SCFH) y 161 N·m<sup>3</sup>/h (6000 SCFH). El flujo preferente de combustible primario se fijó en 13,4 N·m<sup>3</sup>/h (500 SCFH) (del 8 al 16% del total de combustible) para una velocidad de combustión total de 878 a 1757 KW (3 a 6 MMBTU/h).

Los objetivos específicos de los ensayos fueron determinar los requisitos de presión de suministro de combustible para mantener el rendimiento óptimo de NO<sub>x</sub> de las diferentes formas de tobera a las diferentes velocidades de combustión y determinar los niveles óptimos de NO<sub>x</sub> para estas toberas a las diferentes velocidades de combustión. Las áreas de flujo de la tobera se incrementaron gradualmente durante varios experimentos mediante quemadores definidos como toberas de "cruz" y de "cremallera" (véase a continuación) para permitir la operación a baja presión de suministro de combustible y aún así obtener emisiones óptimas de NO<sub>x</sub>.

La figura 10A es una vista en sección superior de la tobera circular -1001- que utiliza dos orificios de descarga -1003- y -1005- en ángulo que tienen secciones transversales circulares. El diámetro del orificio era de 2,8 mm (0,11 pulgadas) y el ángulo radial  $\alpha$  entre los orificios era de 15 grados. La figura 10B muestra una vista en sección lateral de la tobera que muestra el ángulo axial  $\beta$  entre los orificios -1003- y -1005- y eje -1007- del flujo de entrada en el que el ángulo  $\beta$  era de 7 grados. La figura 10C es una vista frontal de la tobera que muestra los orificios -1003- y -1005-.

La figura 11 muestra vistas de la tobera de las figuras 5A, 5B, y 5C (descrita en la presente memoria descriptiva como tobera de "cruz"), e incluye notación de dimensiones y ángulos de ranura. La figura 12 muestra vistas de la tobera de las figuras 3A, 3B, 3C y 3D (que se describe en la presente memoria descriptiva como una tobera de

"cremallera"), e incluye notación de dimensiones y ángulos de ranura. Las dimensiones y los ángulos de las toberas utilizadas en el horno de ensayos de este ejemplo se muestran en la Tabla 1. Los intervalos típicos de estas dimensiones y ángulos se dan en la Tabla 2.

5

Tabla 1  
Dimensiones de las toberas utilizadas en el Horno de Ensayos

	(A)	(P)	(Ro/R1)	(A/Ro)	( $\alpha, \alpha1, \alpha2$ )	( $\beta$ )
Tipo de tobera de combustible montada	Altura de ranura (pulgada) mm	Anchura de ranura (pulgada) mm	Proporción del radio del extremo de tobera a radio central	Proporción de la altura de tobera al radio de la esquina	Ángulo de divergencia axial, grados	Ángulo de divergencia radial, grados
Tobera de cruz (fig. 11)	(1/32 a 1) 0,8 a 25,4	(1/4 a 2) 6,4 a 50,8	1,6	3,7	15	7
Tobera de cremallera (fig.12)	(1/32 a 1) 0,8 a 25,4	(1/4 a 2) 6,4 a 50,8	1,6	3,7	15	7

10

Tabla 2  
Intervalos típicos de las dimensiones de las toberas

	(A)	(P)	(Ro/R1)	(A/Ro)	( $\alpha, \alpha1, \alpha2$ )	( $\beta$ )
Tipo de tobera de combustible secundario	Altura de ranura (pulgada) mm	Anchura de ranura (pulgada) mm	Proporción del radio del extremo de tobera al radio central	Proporción de la altura de tobera al radio de la esquina	Ángulo de divergencia axial, grados	Ángulo de divergencia radial, grados
Tobera de cruz (fig. 11)	(1/32 - 1) 0,8 a 25,4	(1/4 - 2) 6,4 a 50,8	1 - 3	2 - 6	0 - 30	0 - 30
Tobera de cremallera (fig.12)	(1/32 - 1) 0,8 a 25,4	(1/4 - 2) 6,4 a 50,8	1 - 3	2 - 6	0 - 30	0 - 30

15

Las aberturas de tobera circulares se perforaron con brocas espirales estándar, mientras que las aberturas de las toberas de cruz y de cremallera se mecanizaron con una Máquina de Electro Descarga (EDM). Las principales ventajas de EDM son la capacidad de mecanizar formas de tobera complejas, incorporar ángulos de inyección compuestos, proporcionar una mayor precisión dimensional, permitir la consistencia de tobera a tobera, y el mantenimiento de tolerancias más estrechas. Sin embargo, existen métodos alternativos de fabricación, tales como el corte con láser de alta energía, que pueden producir también una calidad equivalente de orificio de tobera como el método EDM.

20

Se hizo funcionar el horno de ensayos utilizando cada uno de los tipos de tobera circular, de cruz y de cremallera para combustión secundaria o en etapas para investigar el efecto de la presión del combustible en la velocidad de combustión y el efecto de la velocidad de combustión sobre las emisiones de NO<sub>x</sub> en los gases de combustión del horno. Los combustibles primario y secundario fueron gas natural.

25

Los resultados de los ensayos se dan en las figuras 13 y 14. En la figura 13, se observa que el intervalo de medición de las velocidades de combustión se logró a las presiones de combustible más bajas para la tobera de cremallera de la figura 1 (puntos triangulares de datos), a las presiones de combustible intermedias para la tobera de estrella de la figura 4 (puntos de datos cuadrados), y a las presiones de combustible más elevadas para la tobera circular de las figuras 10A, B, y C (puntos de datos circulares). Por lo tanto, la tobera de cremallera de la figura 1 es la tobera preferente para su utilización en la etapa de combustible secundario en sistemas de quemadores del tipo ilustrado en las figuras 8 y 9, en particular para combustible disponible sólo a presiones menores.

30

35

En la figura 14, que es un gráfico de la concentración de NO<sub>x</sub> en los gases de descarga del horno de ensayo en función de la velocidad de combustión, se observa que se midieron las concentraciones más bajas de NO<sub>x</sub> para la tobera de cremallera de la figura 1 (puntos de datos triangulares). Se midieron mayores concentraciones de NO<sub>x</sub> para la tobera de estrella de la figura 4 (puntos de datos cuadrados) y se midieron las mayores concentraciones de NO<sub>x</sub> para la tobera circular de las figuras 10A, B, y C (puntos de datos circulares). Estos resultados indican que la tobera de cremallera funciona con niveles de emisión de NO<sub>x</sub> muy bajos y es mucho mejor que las toberas de estrella y circular.

40

Las toberas en forma de cruz y de cremallera de la presente invención funcionan con menores temperaturas de operación de punta de tobera que la tobera circular de las figuras 10A, B y C. Se observó durante los experimentos de laboratorio que la presión general de suministro de combustible para la tobera circular requirió de aumentos para conseguir un menor coeficiente de flujo de tobera a medida que las temperaturas de funcionamiento de la tobera aumentaban por encima de la temperatura ambiente. Esto fue debido en parte a un calentamiento local de las puntas de las toberas circulares debido al efecto de expansión del gas combustible a temperaturas de funcionamiento más elevadas. Por esta razón, los datos de presión de suministro de combustible en la punta circular requirieron de ajuste para su funcionamiento a temperaturas más elevadas. El factor de corrección del flujo desde temperatura ambiente hasta la temperatura de funcionamiento de la punta, aproximadamente 232°C (450°F) fue, aproximadamente, de 0,58 para la tobera circular, y esto dio como resultado un 42% menos de flujo de combustible debido a la temperatura de la punta de la tobera.

Por el contrario, las toberas de combustible de cremallera tienen un área de salida de flujo relativamente grande, y la punta de la tobera se enfrió activamente por el flujo de combustible de gas que sale. A diferencia de la tobera circular, que tiene una región de estancamiento relativamente grande en la punta, la tobera de cremallera tiene una zona de enfriamiento mucho más activa debido a la cantidad de ranuras estrechas que se cruzan en la punta de la tobera. La tobera de cremallera requiere un factor de corrección del caudal menor de 0,77 desde temperatura ambiente hasta la temperatura de funcionamiento de la punta, aproximadamente 121°C (250°F) y, por lo tanto, requiere un factor de corrección de flujo de combustible, aproximadamente, un 33% menor. Esta cifra es significativamente menor que el factor de corrección de flujo de combustible a temperatura de 232°C (450°F) necesario para las toberas circulares. En general, las toberas circulares requieren una presión de alimentación de combustible 5 veces mayor que la tobera de cremallera para la misma velocidad de combustión, probablemente debido a la eficacia de arrastre relativamente insatisfactoria y una mayor temperatura de funcionamiento de la punta de la tobera circular. Entre las ventajas de temperaturas de funcionamiento más bajas para las toberas de cremallera o de cruz se incluyen (a) menor tendencia a la formación de coques cuando se utilizan combustibles de mayor contenido de carbono, (b) capacidad de utilizar caudales menores de combustible o combustibles de mayor poder calorífico, y (c) capacidad de utilizar materiales menos costosos para el material de la tobera. Debido a las diferencias de temperatura de funcionamiento de la punta, se puede utilizar acero inoxidable tipo 304 ó 310 para las toberas de cremallera o de cruz mientras que pueden ser necesarias Hastelloy®, Inconel® u otras aleaciones de alta temperatura para las toberas circulares.

El craqueo térmico es una preocupación en muchas aplicaciones de horno de refinería en el que el gas combustible contiene hidrocarburos C<sub>1</sub> a C<sub>4</sub>. El craqueo de los hidrocarburos más pesados, que tiene lugar mucho más fácilmente a las temperaturas de funcionamiento más elevadas de las toberas circulares, produce carbono que puede obturar las toberas de los quemadores, provoca un sobrecalentamiento de las piezas del quemador, reduce la productividad del quemador, y da como resultado una eficiencia térmica insatisfactoria. Por lo tanto, las temperaturas más bajas de funcionamiento de las toberas de cremallera y de cruz permiten un funcionamiento sin mantenimiento, y esto es una ventaja operativa fundamental en la aplicación de estos quemadores en operaciones de hornos de refinería.

**REIVINDICACIONES**

1. Conjunto de quemador que comprende:

5 (a) un soporte de llama central (801) que tiene medios de entrada (803) para un gas oxidante (815), medios de entrada (813) para un combustible primario (816), una región de combustión (817, 819, 821) para quemar el gas oxidante (815) y el combustible primario (816), y una salida para la descarga de un efluente primario desde el soporte central de llama (801), y

10 (b) una pluralidad de toberas inyectoras de combustible secundario (833) que rodean la salida del soporte de llama central (801), en las que cada tobera inyectora de combustible secundario (833) comprende

(1) un cuerpo de tobera (3) que tiene una cara de entrada (203), una cara de salida (17), y un eje de flujo de entrada (201) que pasa a través de las caras de entrada y salida, y

15 (2) una o más ranuras (7, 9, 11, 13, 15) que se extienden a través del cuerpo de la tobera (3) desde la cara de entrada (203) hasta la cara de salida (17), teniendo cada ranura (7, 9, 11, 13, 15) un eje de ranura y un plano central de ranura.

20 2. Conjunto de quemador, según la reivindicación 1, en el que cada tobera inyectora de combustible secundario (833) tiene dos o más ranuras (7, 9, 11, 13, 15) y los ejes de ranura de, como mínimo, dos ranuras no son paralelos entre sí.

25 3. Conjunto de quemador, según la reivindicación 1, en el que cada tobera inyectora de combustible secundario (833) tiene dos o más ranuras (7, 9, 11, 13, 15) y, como mínimo, dos ranuras se cruzan entre sí.

30 4. Conjunto de quemador, según la reivindicación 3, en el que el cuerpo de tobera tiene cuatro ranuras (507, 508, 511, 513) en las que una primera y una segunda ranura (507, 508) se cruzan entre sí y en las que una tercera y una cuarta ranura (511, 513) se cruzan entre sí.

5. Conjunto de quemador, según la reivindicación 3, en el que el cuerpo de tobera tiene tres o más ranuras (7, 9, 11, 13, 15) y una primera ranura (7) se cruza con cada de las otras ranuras (9, 11, 13, 15).

35 6. Conjunto de quemador, según la reivindicación 5, en el que el plano central de la primera ranura (7) corta al eje del flujo de entrada (201) en un ángulo interior de entre 0 y, aproximadamente, 15 grados.

7. Conjunto de quemador, según la reivindicación 5, en el que el plano central de cualquiera de las otras ranuras (9, 11, 13, 15) cruza al eje del flujo de entrada (201) en un ángulo interior de entre 0 y, aproximadamente, 30 grados.

40 8. Conjunto de quemador, según la reivindicación 5, en el que los planos centrales de las otras dos ranuras adyacentes (8, 11) se cruzan en un ángulo interior de entre 0 y, aproximadamente, 15 grados.

45 9. Conjunto de quemador, según la reivindicación 8, en el que las dos ranuras adyacentes (8, 11) se cortan en la cara de entrada (203) del cuerpo de la tobera (3).

10. Proceso de combustión que comprende:

(a) proporcionar un conjunto de quemador, que incluye:

50 (1) un soporte central de llama (801) que tiene medios de entrada (803) para un gas oxidante (815), medios de entrada (813) para un combustible primario (816), una región de combustión (817, 819, 821) para quemar el gas oxidante (815) y el combustible primario (816), y una salida para la descarga de un efluente primario desde el soporte de llama central (801), y

55 (2) una pluralidad de toberas inyectoras de combustible secundario (833) que rodean la salida del soporte de llama central (801), en el que cada inyector de combustible secundario (833) comprende

(2a) un cuerpo de tobera (3) que tiene una cara de entrada (203), una cara de salida (17), y un eje de flujo de entrada (201) que pasa a través de las caras de entrada y salida, y

60 (2b) una o más ranuras (7, 9, 11, 13, 15) que se extienden a través del cuerpo de la tobera (3) desde la cara de entrada (203) hasta la cara de salida (17), teniendo cada ranura (7, 9, 11, 13, 15) un eje de ranura y un plano central de ranura;

65 (b) introducir el combustible primario (816) y el gas oxidante (815) en el soporte central de llama (801), quemar el combustible primario con una parte del gas oxidante en la región de combustión (817, 819, 821) del soporte de llama

central (801), y descargar un efluente primario que contiene los productos de la combustión y el exceso de gas oxidante desde la salida del soporte de llama central (801), y

5 (c) inyectar el combustible secundario (835) a través de las toberas inyectoras de combustible secundario (833) en el efluente primario desde la salida del soporte de llama central(801) y quemar el combustible secundario con el exceso de gas oxidante.

10 11. Proceso de combustión, según la reivindicación 10, en el que el combustible primario (816) y el combustible secundario (835) son gases que tienen composiciones diferentes.

12. Proceso de combustión, según la reivindicación 11, en el que el combustible primario (816) es gas natural y el combustible secundario comprende hidrógeno, metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono obtenido de un sistema de adsorción de presión oscilante.

15 13. Proceso de combustión, según la reivindicación 11, en el que el combustible secundario (835) se introduce en las toberas inyectoras de combustible secundario a una presión menor de 122 KPa (3 psig).

20 14. Proceso de combustión, según la reivindicación 10, en el que el combustible primario (816) y el combustible secundario (835) son gases que tienen la misma composición.

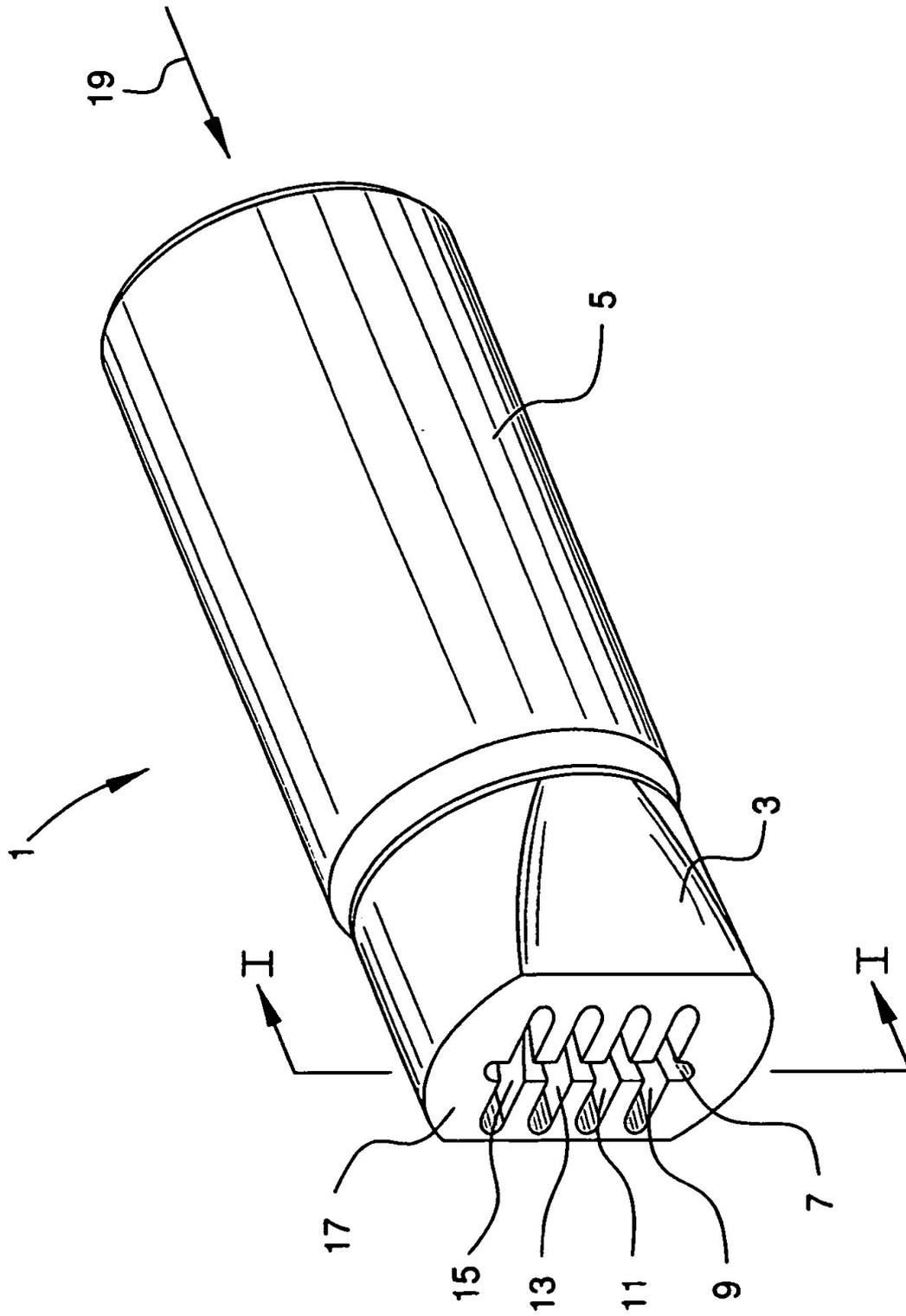


FIG. 1

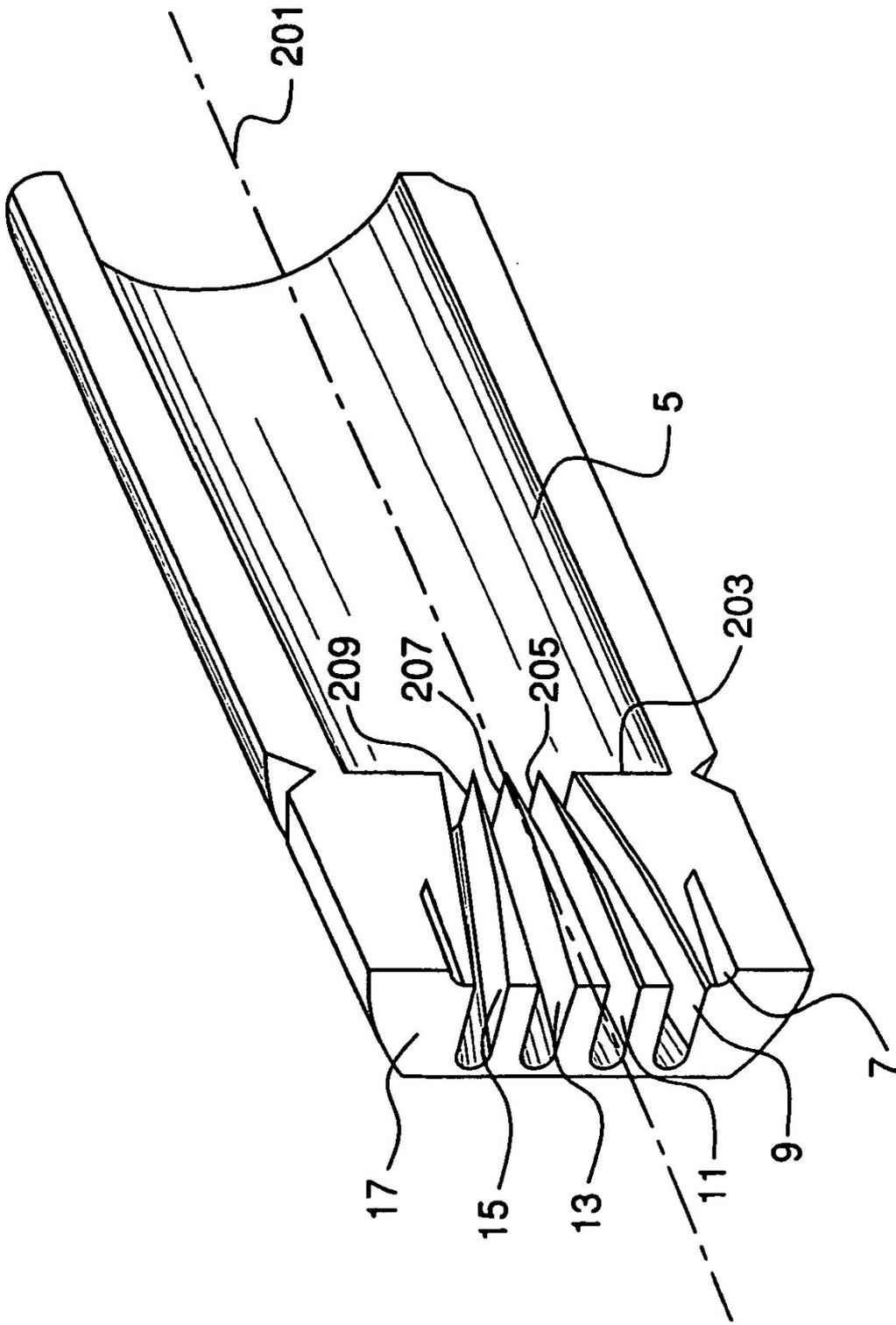


FIG. 2

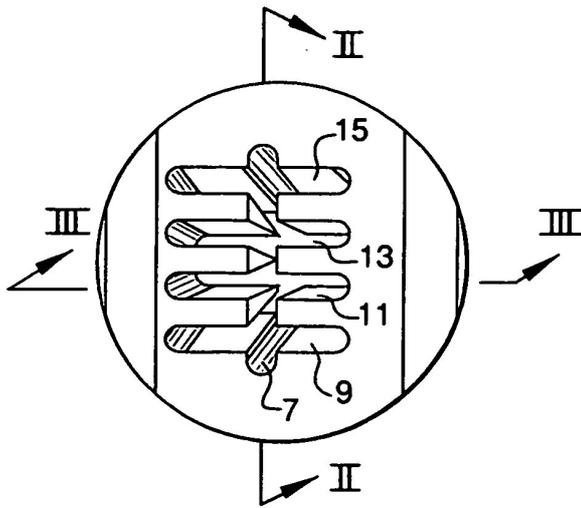


FIG. 3A

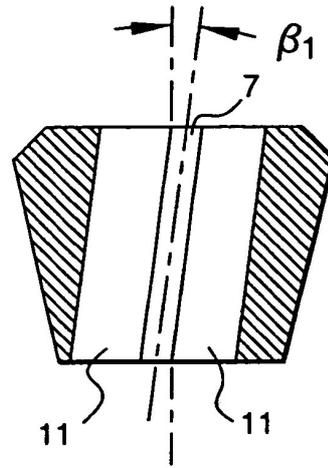


FIG. 3C

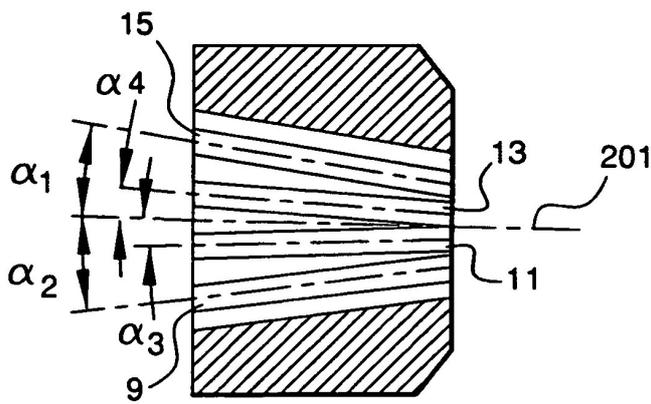


FIG. 3B

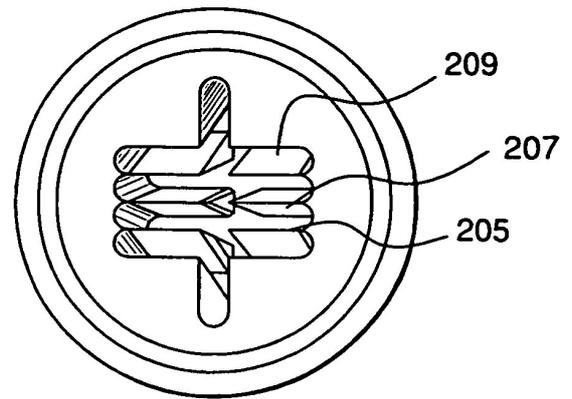


FIG. 3D

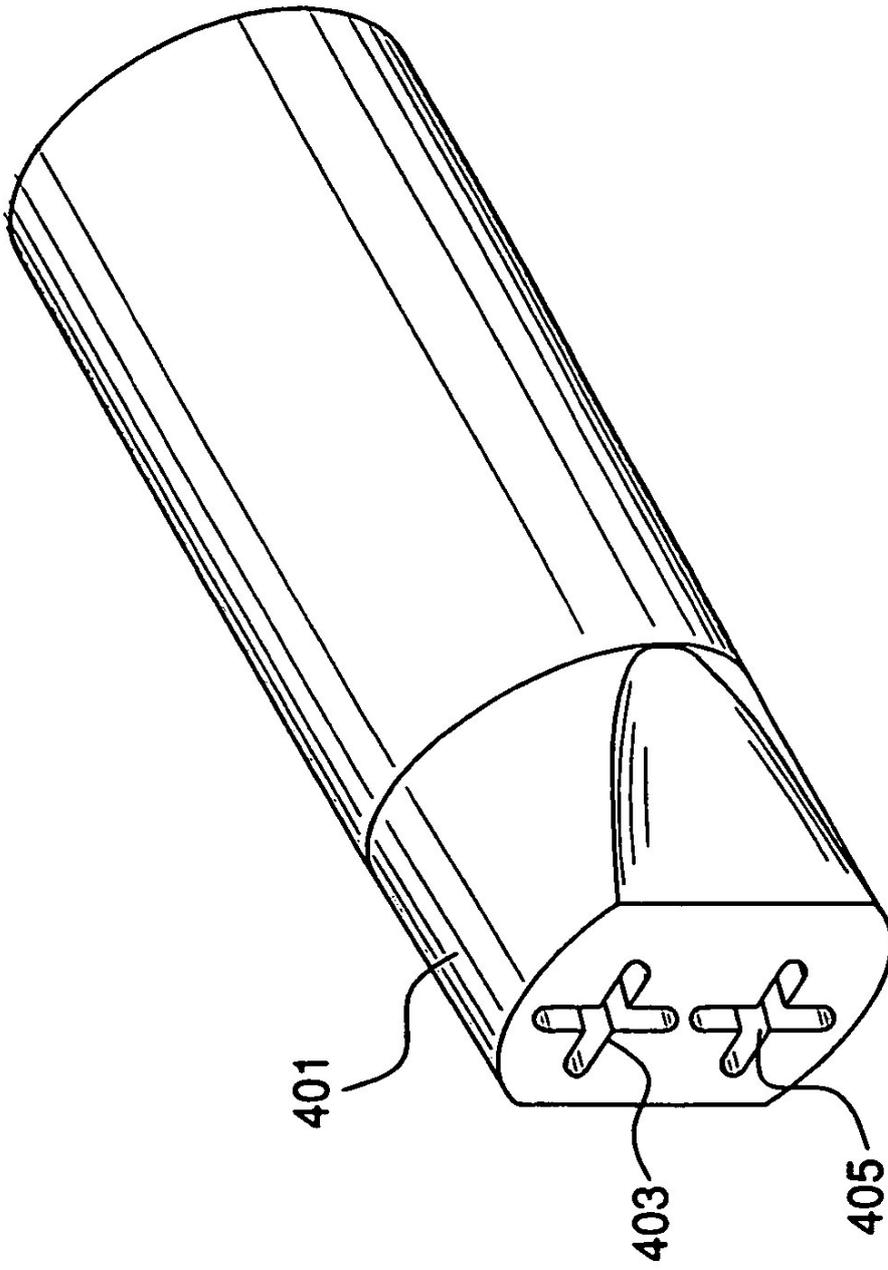


FIG. 4

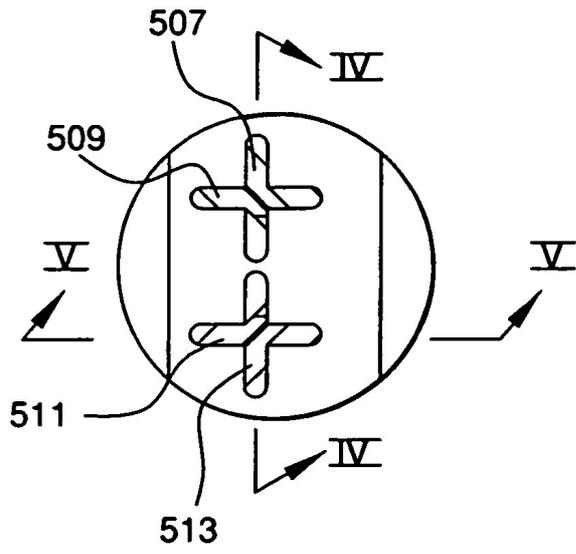


FIG. 5A

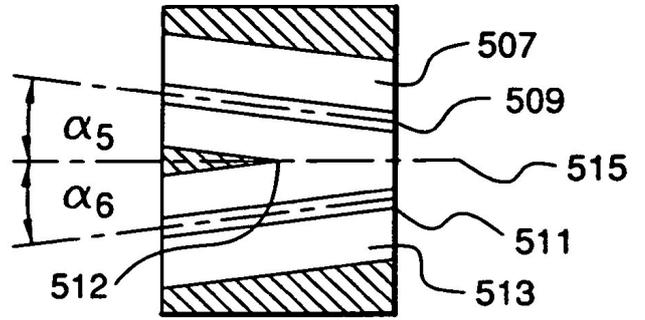


FIG. 5B

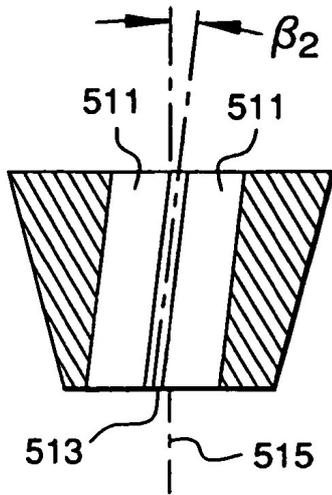


FIG. 5C

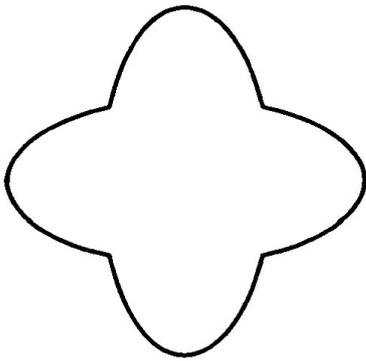
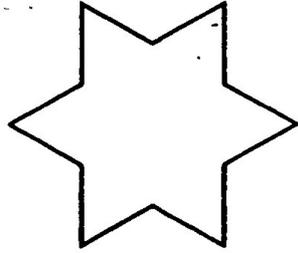
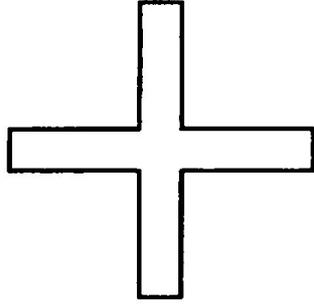


FIG. 6A

FIG. 6B

FIG. 6C

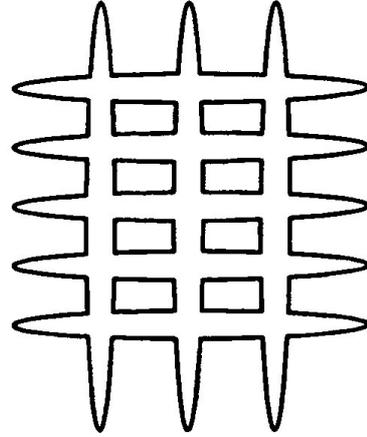
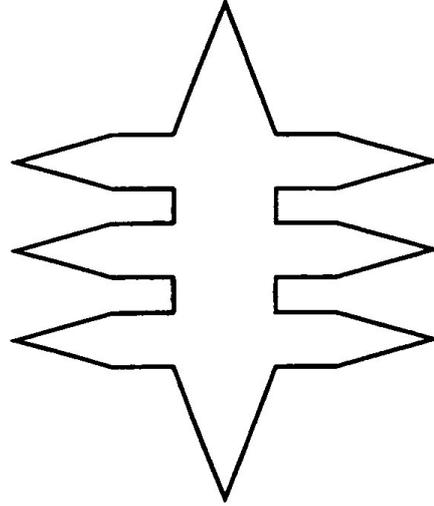
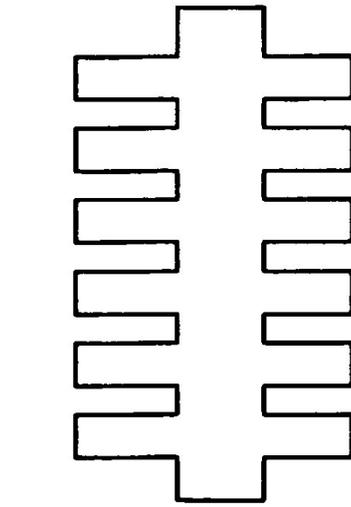


FIG. 6D

FIG. 6E

FIG. 6F

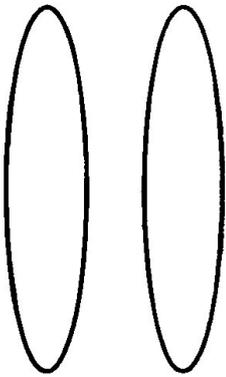


FIG. 7A

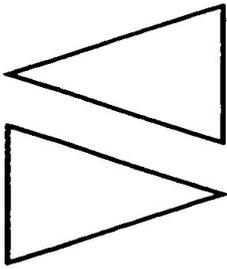


FIG. 7B

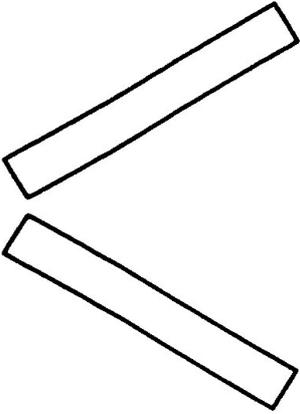


FIG. 7C

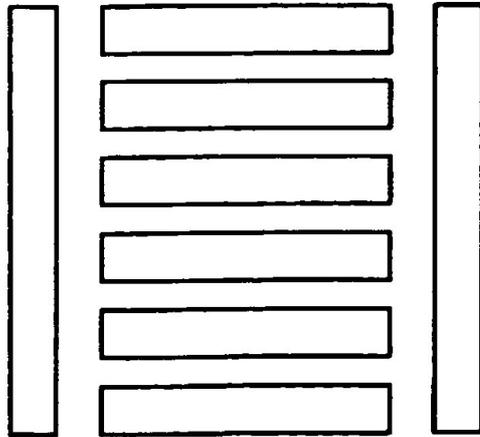


FIG. 7D

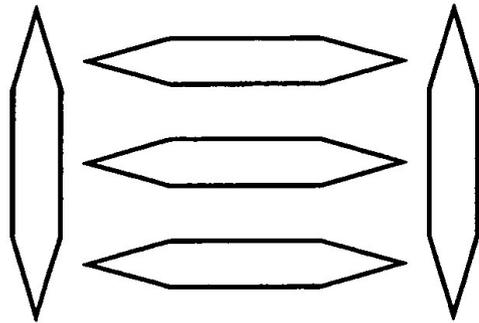


FIG. 7E

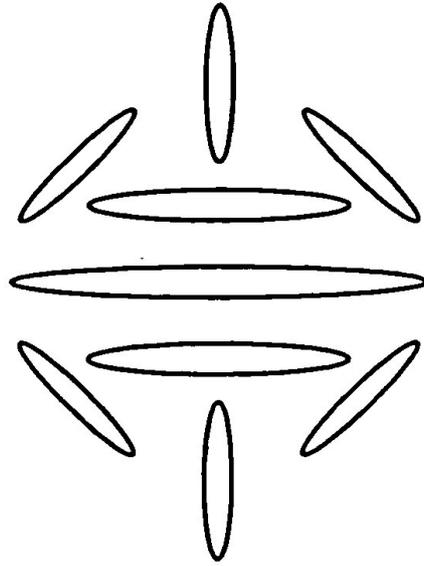


FIG. 7F

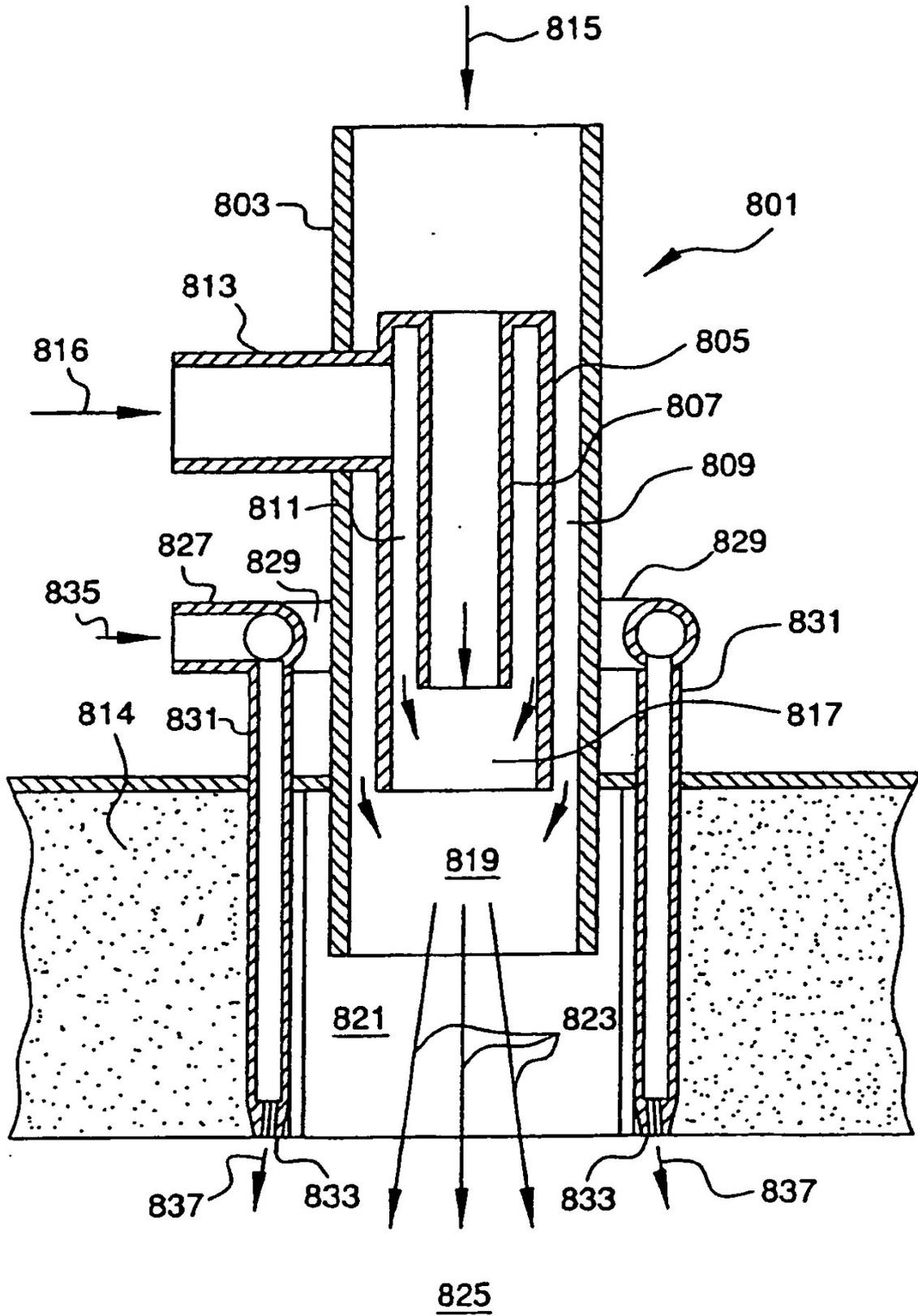


FIG. 8

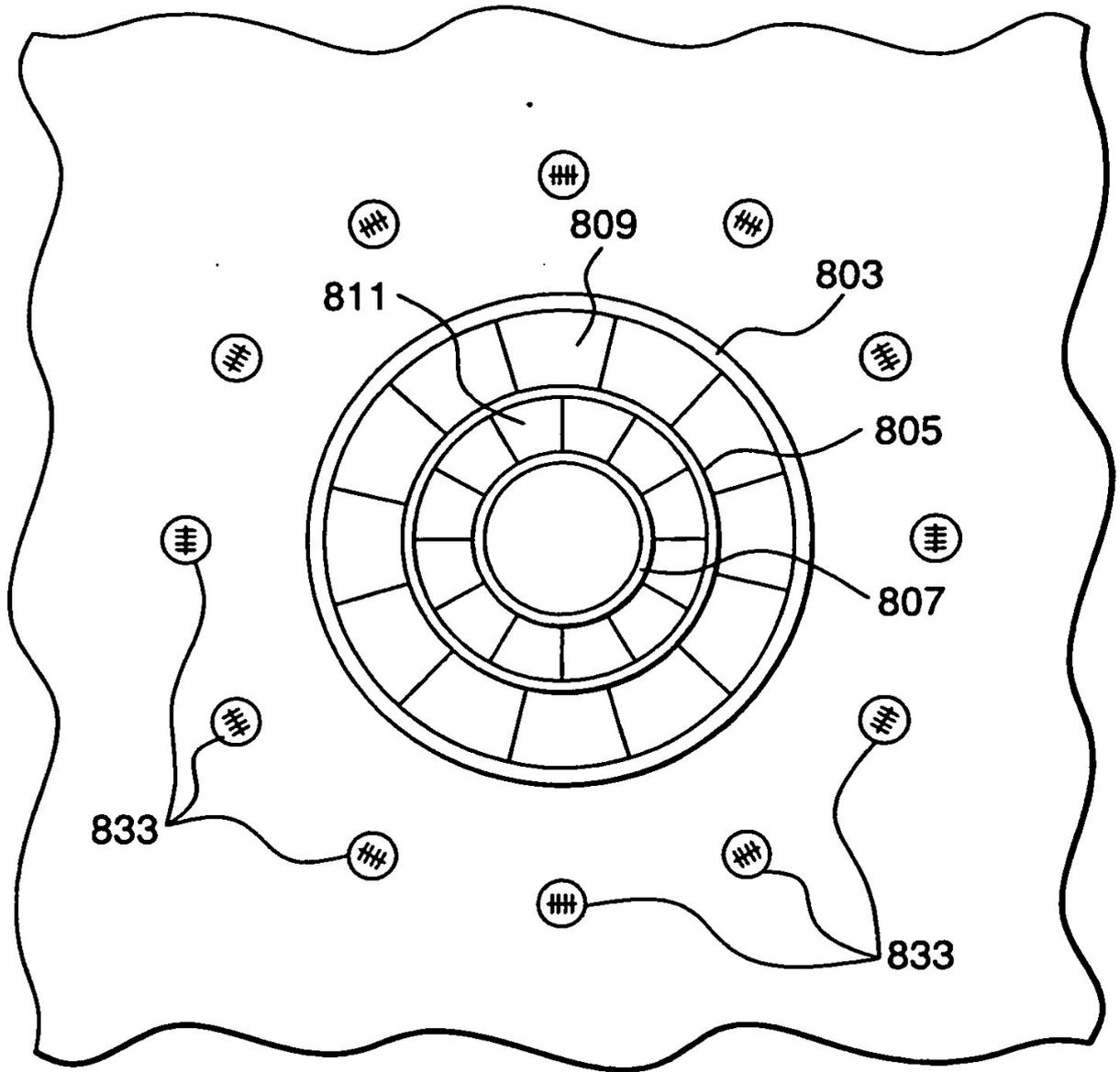


FIG. 9

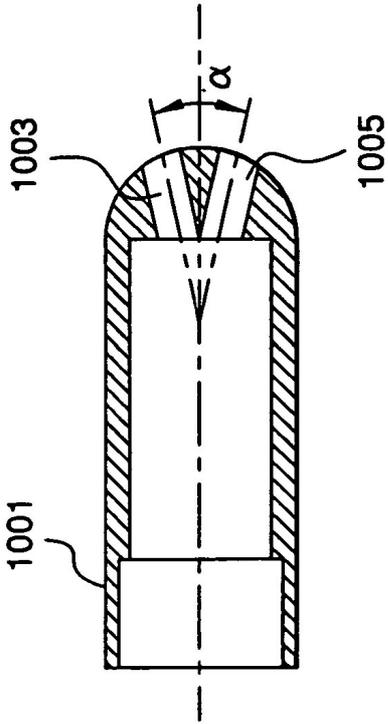


FIG. 10A

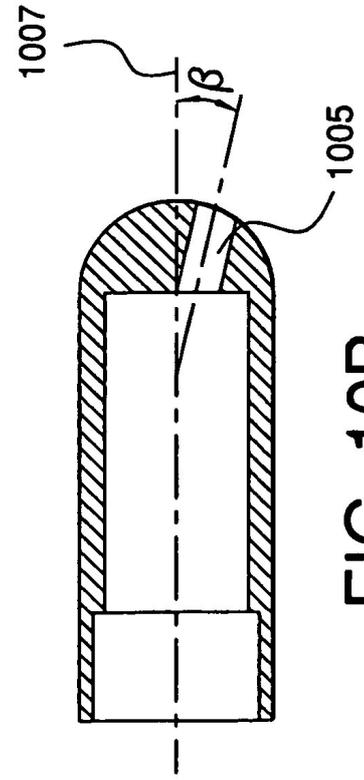


FIG. 10B

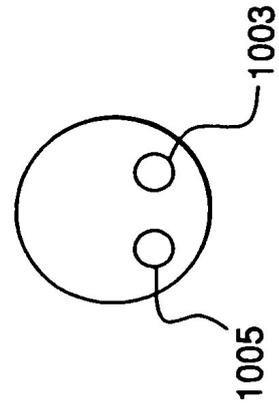


FIG. 10C

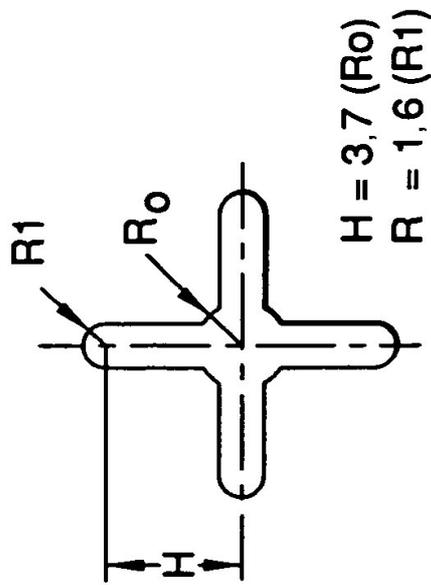
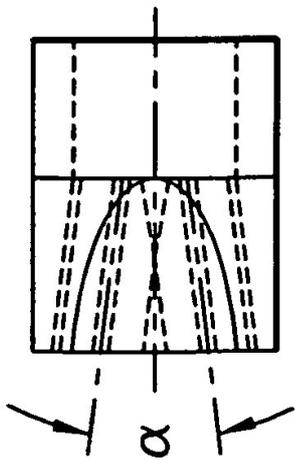
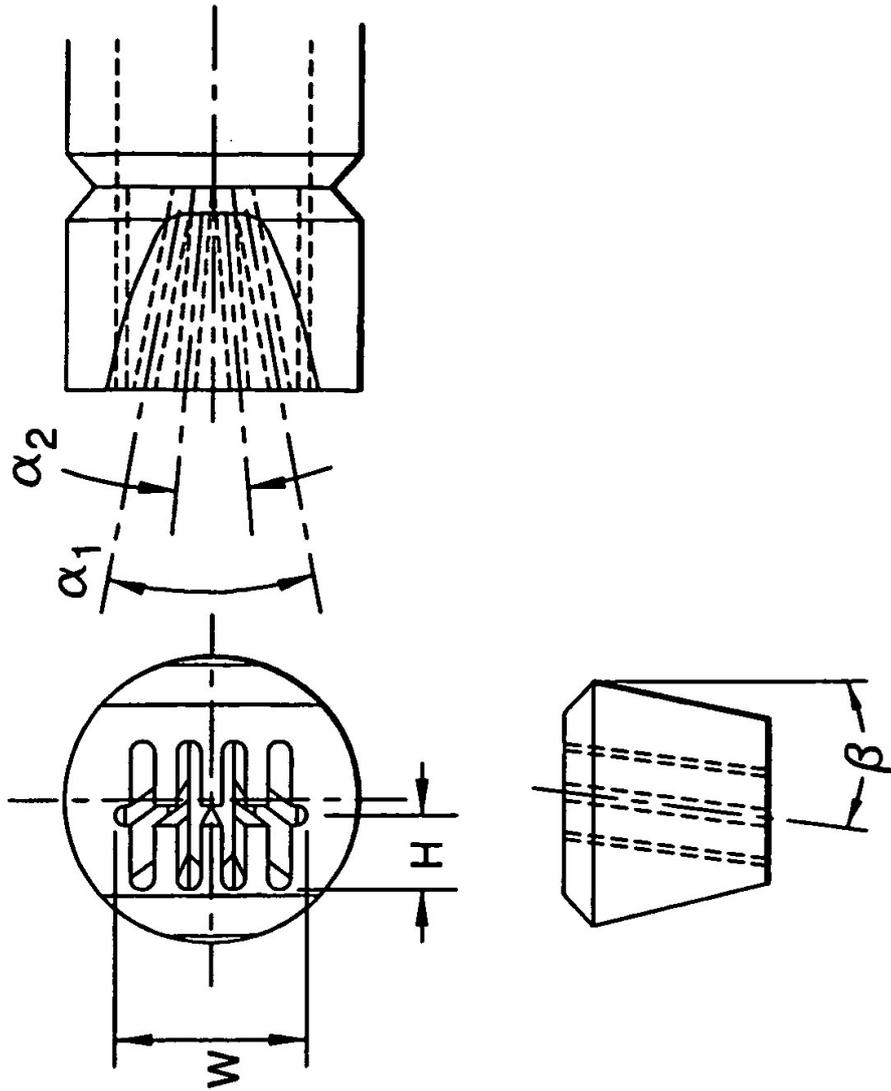


FIG. 12

FIG. 11

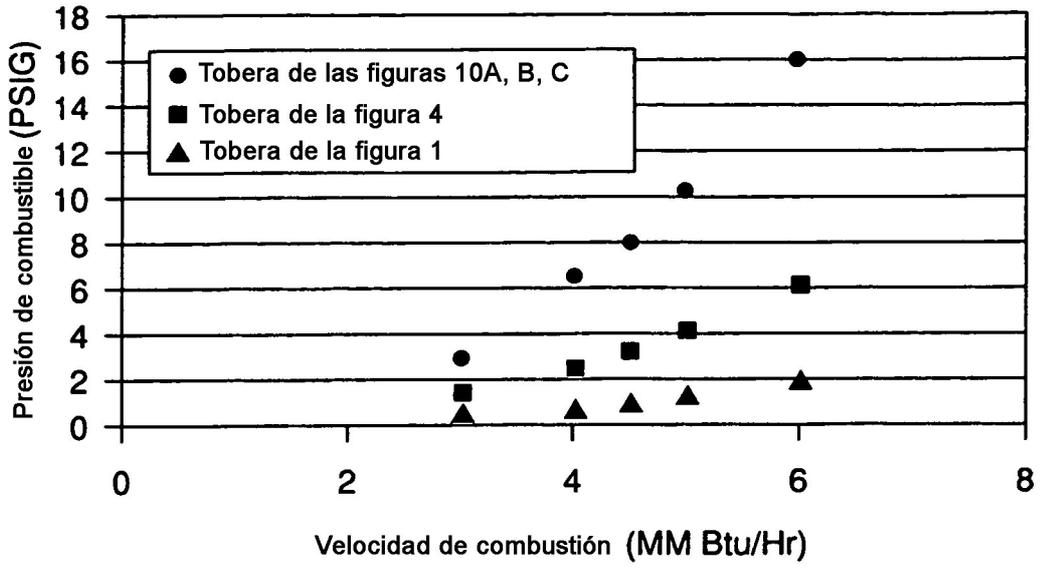


FIG. 13

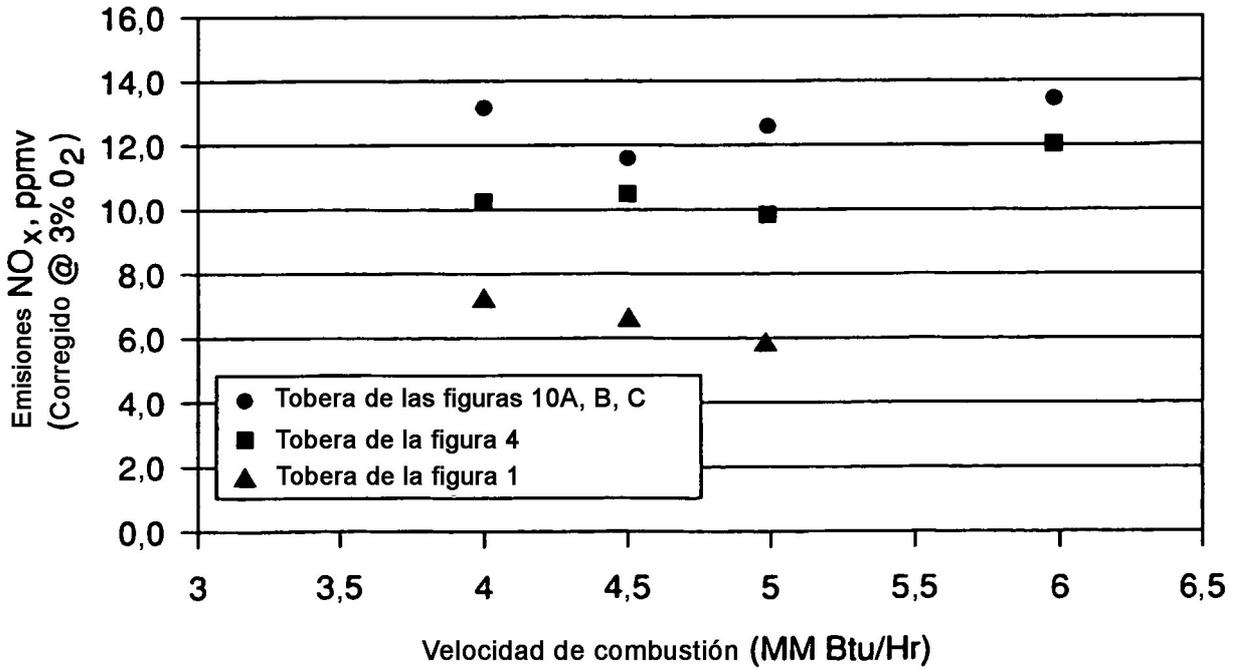


FIG. 14