

Método para incrementar la eficiencia en quemadores y quemador

[001] La presente invención se refiere a quemadores perfeccionados para uso en hornos para la producción de cemento.

Estado de la Técnica

[002] Como se sabe, la producción de cemento se procesa, mencionándola de forma sucinta, a través de las etapas de extracción de materias primas; molienda, mezcla y homogeneización; clínkerización en hornos rotatorios; enfriamiento del clínker; molienda y ensacado del cemento producido.

[003] Entre estas etapas, la más crítica es la referida clínkerización de la mezcla previamente homogeneizada, la cual tiene lugar en grandes hornos rotatorios, de conformación cilíndrica, dotados de quemadores controlados, a fin de establecer una temperatura adecuada en cada región del horno rotatorio. Considerando este objetivo, se resaltan dos aspectos fundamentales en relación a los referidos quemadores: la eficiencia energética y la prontitud en las respuestas térmicas.

[004] Un ejemplo de un horno rotatorio se muestra esquemáticamente en la Figura 1. En ésta, con (1) se muestra un horno rotatorio, destinado a la quema de dicha mezcla (M), previamente homogeneizada en contracorriente. Con (2) se indica un quemador, alimentado con aire primario (Ap) y combustible, por ejemplo, coque, carbón u otros. Con (3) se muestra el enfriador de clínker, que recibe el clínker caliente resultante de la quema de la mezcla (M) que proviene del interior del horno (1). En los sistemas actuales, el calor liberado del enfriador (3) se transfiere al flujo de aire secundario (As), alcanzando así temperaturas del orden de 1000° C. En funcionamiento, el quemador (2) es encendido (ignición de la mezcla aire/combustible) y mantenido en funcionamiento hasta que la temperatura del horno (1) alcance un valor predeterminado, que gira alrededor de 1000° C en la punta de la alimentación del material (1a). En ese momento, la mezcla (M) homogeneizada es alimentada en el extremo superior (1a) del horno (1), en rotación, y ésta se mueve al extremo inferior (1b) de salida. Dado que el quemador está posicionado en la región central del extremo inferior (1b) del horno (1), la llama (F) creada por la quema del combustible se desarrolla hacia el interior del horno (1), proporcionando la generación de mayor gradiente de temperaturas cerca del extremo (1b) y un menor gradiente de temperaturas cerca del extremo (1a) del horno (1). De esta forma, el avance de la mezcla (M) es en el sentido de las temperaturas más altas.

[005] Terminada la etapa de quema de la mezcla (M) y ya transformada en clínker (C), este material se vierte en un enfriador (3) posicionado por debajo de la salida del horno (1). El calor (H) emanado de este enfriador (3) calienta el flujo del aire secundario (As), el cual se mezcla con los flujos de aire y combustible inyectados por el quemador (2) y formando la llama (F). Suele señalar que el flujo de aire secundario se insufla a través del enfriador (3) y también se aporta para el interior del horno (1) a través un extractor.

[006] En particular, se debe aclarar que la velocidad de inyección del aire primario (Ap) y del combustible para el interior del horno (1), para generar la llama (F), es bastante significativa, alcanzando velocidades del orden de cientos de metros por segundo. Como resultado, se genera una baja presión en la región del extremo inferior (1b) del horno, proporcionando, de esa forma, la succión del aire caliente o aire secundario (As). Suele destacar aún que tal flujo de aire secundario (As), como se sabe, es esencial en la conformación y en el comportamiento térmico de la llama (F). Además, las técnicas actuales de diseño para los quemadores están basadas en la alimentación del flujo de aire primario (AP) en cantidad inferior a la relación estequiométrica para la quema del combustible, siendo el aire que sobra suplido, en exceso (relación aire combustible pobre), por el flujo de aire secundario (As).

[007] Un ejemplo de quemador conocido en el estado de la técnica es el descrito en el documento EP 0628768. Tal documento enseña un quemador específicamente destinado para la quema de combustibles sólidos, tal como polvo fino de carbón, generando salidas de aire (15) y de combustible (12) a partir de sus conductos de alimentación (10, 17).

[008] En lo que se refiere particularmente a los quemadores para la producción de cemento, los quemadores actualmente disponibles en el mercado presentan una configuración básicamente cilíndrica y compuesta por tubos concéntricos, tal como se muestra en las figuras 2A, 2B y 2C. Como resultado de esta conformación concéntrica, la boquilla del quemador resulta (figura 2B y 2C) que presenta una serie de regiones anulares dotadas de respectivos orificios, y/o ranuras, en cantidades previamente determinadas, a través de las cuales se inyectan flujos de aire primario y/o combustible para la quema. Específicamente, los tipos más comúnmente empleados de quemadores son el anular (figura 2C) y el multicanal (figura 2B) con inyector de aire discretos.

[009] Independientemente del tipo de quemador o específicamente de la configuración de la cabeza del quemador, el cuerpo del quemador (2) es definido por una serie de tubos cilíndricos concéntricos (11-15, figura 2A), siendo que entre cada par de tubos adyacentes está definida una zona anular de inyección. Cualquiera que sea el tipo de quemador (2), las regiones anulares

de emisión se ilustran en las figuras 2B y 2C, y comprenden: flujo de aire primario externo (9); flujo de aire primario tangencial (8); y flujo de aire de transporte y de combustible (7). Las zonas anulares más internas son previstas para la alimentación de un flujo de aire primario interno (6) y un flujo de aire de transporte de residuos sólidos (5). Sin embargo, tales flujos presentan muy poca influencia en la conformación de la llama (F) y no siempre son empleados.

[0010] En el caso particular del cabezal de combustión con sección anular (figura 2C), las aperturas para los flujos externo (9) y tangencial (8) se presentan en forma de aperturas anulares, mientras que en el cabezal de combustión multicanal, las aperturas para los flujos externo (9) y tangencial (8) se definen por orificios posicionados de forma radial. Además, en el cabezal de combustión multicanal se prevén ranuras (9', 8') resultantes de los vanos anulares existentes entre los elementos cilíndricos concéntricos (11, 12) y (12, 13), respectivamente, en función de la dilatación de cada uno de los tubos cilíndricos concéntricos (11-15).

[0011] Por último, la formación de la llama es el resultado de la configuración adoptada para el quemador (configuración del diseño), es decir, la configuración de los anillos y/o el número de orificios de cada anillo, así como la naturaleza del combustible, oxidante, presión de alimentación de los diversos flujos primarios (AP) (parámetros operacionales), y otros. Además, y como ya se mencionó, tales configuraciones y parámetros también están directamente vinculados con la intensidad del flujo de aire secundario (As), el cual es aspirado por el quemador en función del flujo de aire primario (Ap).

Fundamentos de la invención

[0012] Así, y con el objetivo de incrementar el rendimiento de los quemadores, los presentes inventores procedieron a una serie de estudios específicos.

[0013] Estos estudios mostraron que el principal parámetro capaz de mejorar significativamente el rendimiento de los quemadores está asociado a la capacidad de aspiración de aire secundario por el quemador, en los primeros metros de la llama.

[0014] Analizando a fondo ese fenómeno de aspiración de aire secundario por el quemador, fue posible aislar tres variables principales:

- flujo de aire primario;
- velocidad de inyección del aire primario; y
- geometría de inyección de aire primario.

[0015] Así, mientras las características relativas al flujo de aire primario y las velocidades de inyección de los flujos individuales del aire primario son parámetros operativos, el cambio de geometría de las boquillas y/o ranuras de inyección de los flujos individuales de aire primario de un quemador en funcionamiento es de muy difícil diseño y ejecución, dadas las altas temperaturas y materiales empleados. En los poquísimos casos donde el quemador presenta esta opción de fábrica, durante su funcionamiento los mecanismos empleados no resisten a las condiciones extremas del interior del horno.

[0016] Además, la fase de diseño de un quemador, y en particular de la configuración del cabezal de combustión, es una fase bastante compleja y que demanda una gran cantidad de tiempo. En general, estando ya definidas las futuras condiciones operativas de un horno, los proyectistas pasan a desarrollar el quemador en función de tales condiciones operativas, experimentando cada posible configuración del quemador a través de ensayos vía CFD (Computational Fluid Dynamics). Obviamente, y como queda claro a cualquier técnico del sector, el procedimiento tradicional del diseño puede involucrar una cantidad bastante expresiva de horas de procesamiento, incrementando innecesariamente el tiempo total y los costos de diseño.

Objetos de la Invención

[0017] Constituye un primer objeto de la presente invención un método destinado a incrementar la eficiencia en quemadores para hornos de producción de cemento, mediante la racionalización de la fase de diseño del quemador.

[0018] Constituye un segundo objeto de la invención un método apto para proporcionar una previsión del comportamiento operativo de un quemador, basado en análisis de un factor adimensional de comportamiento operativo.

[0019] Constituye un tercer objeto de la invención un quemador para hornos rotatorios de producción de cemento, cuyas características dimensionales de las boquillas de inyección de los flujos de primarios resulten de un factor adimensional.

Síntesis de la Invención

[0020] Fue sorprendentemente descubierto por los inventores que la metodología convencional de diseño puede ser, de manera ventajosa, simplificada mediante la sustitución de las etapas de ensayo vía CFD de las configuraciones de los cabezales del quemador en prueba, por el uso de una simple fórmula matemática. Más específicamente, y a partir de la combinación entre la experiencia de los inventores y numerosas simulaciones en CFD, los

inventores pudieron generar una fórmula matemática (ecuación 1) simple y un método simplificado para hacer la prueba de viabilidad y eficiencia de un quemador en proyecto.

[0021] Como resultado de diversos experimentos realizados a través de la metodología desarrollada, también fue posible para los inventores definir ciertas características innovadoras para los quemadores de hornos rotatorios para la producción de cemento, características estas que permiten una mayor aspiración del flujo de aire secundario y, por lo tanto, una quema más eficiente del combustible por los flujos de aire primario y secundario, así como una conformación de la llama por el flujo de aire secundario.

[0022] En particular, la presente invención se refiere a un quemador de un tipo para ser empleado en hornos rotatorios para la producción de cemento y que comprende una estructura multi-tubular concéntrica formada por tubos, y entre los cuales se definen respectivos canales cilíndricos de alimentación, siendo que en el extremo inferior de dicho quemador se prevé un cabezal de combustión, en el cual están perforadas las diversas boquillas de inyección del combustible y de aire primario, mientras que en el extremo superior del quemador están dispuestos los medios de conexión con las fuentes de combustible y de aire primario, y que referido cabezal de combustión comprende: una primera serie de boquillas destinadas a inyectar un flujo externo de aire primario; una segunda serie de boquillas, con sección en arco anular, destinadas a la inyección de un flujo de aire primario tangencial; una tercera serie de aperturas, con sección en arco anular, destinadas a la inyección del combustible y del aire de transporte. Además, los extremos inferiores del primero y del segundo tubos del quemador están enlazados y definen entre ellos una superficie anular externa continua del quemador, siendo que entre el primer tubo y el segundo tubo se define un canal de alimentación del flujo de aire primario externo. Referidas boquillas, con sección transversal circular están dispuestas dentro de una área de inscripción que es externamente limitada por una circunferencia externa, de rayo R_e y que tangencia el punto radialmente más externo de cada una de las boquillas e internamente limitada por una circunferencia externa de rayo R_i y que tangencia el punto radialmente más interno de cada una de las boquillas, siendo que, en dicha área de inscripción, la relación entre el área abierta A_o de las boquillas y el área cerrada A_c se limita a: $0,12 < A_o/A_c < 0,27$, en la que el área abierta A_o corresponde a la suma de las áreas de cada una de las boquillas multiplicada por el número de boquillas del cabezal de combustión, y el área cerrada A_c corresponde al área de inscripción menos el área abierta A_o . En particular, la relación entre el área abierta A_o de las boquillas y el área cerrada A_c se limita a: $0,19 < A_o/A_c < 0,25$. Una junta de dilatación está dispuesta en la región entre el extremo superior

del segundo tubo y la brida. Alternativamente, la junta de dilatación se dispone en la región entre el extremo superior del primer tubo y la brida.

[0023] El objeto de la presente invención será mejor entendido y definido a partir de la descripción detallada a continuación, hecha con referencia a una forma particular de realización de la invención y no limitativa, con base en las figuras que son meramente ejemplificativas, en las cuales:

- la figura 1 es una vista esquemática parcial de un conjunto para la producción de cemento, que comprende horno, quemador y enfriador, de acuerdo con el estado de la técnica;
- la figura 2A es una vista lateral, parcialmente seccionada, de un quemador de acuerdo con el estado de la técnica;
- la figura 2B es una vista frontal de un cabezal de combustión multicanal con inyectores discretos de un quemador de acuerdo con el estado de la técnica;
- la figura 2C es una vista frontal de cabezal de combustión anular de un quemador de acuerdo con el estado de la técnica;
- la figura 3 es una vista frontal de un quemador, de acuerdo con la presente invención;
- la figura 4 es una vista lateral en corte del cuerpo del quemador de acuerdo con la presente invención, ilustrando la junta de dilatación;
- la figura 5 es una vista esquemática y fuera de escala, ilustrando la región anular más externa del cabezal de combustión y las boquillas de salida del aire externo;
- la figura 6 es un gráfico ilustrando el flujo de aire secundario (As) total medido en planos determinados (CS), a partir del cabezal de combustión, comparando tres soluciones de la invención con un quemador anular del estado de la técnica;
- las figuras 7A y 7B son trazados de CFD mostrando la conformación de la llama F, respectivamente, para el cabezal de combustión de la presente invención y para un cabezal de combustión anular;
- las figuras 8A y 8B son trazados de CFD que muestran el perfil de temperaturas, dentro de un horno alimentado a través de quemadores dotados de cabezales de combustión conforme a la presente invención y del tipo anular, respectivamente;

- las figuras 9A y 9B ilustran también, a través de imágenes generadas por CFD, el comportamiento dinámico de las líneas de los flujos primario y secundario obtenidos por los cabezales de combustión de la invención y del tipo anular;
- las figuras 10A y 10B son imágenes de microscopía con aumento de 200 veces del clínker producido, respectivamente, en hornos dotados de quemadores con cabezales de combustión de acuerdo con la invención y del tipo anular, de acuerdo con el estado de la técnica; y
- La figura 11 ilustra un gráfico de barras indicando la cantidad de energía necesaria para la molienda del clínker producido por la unidad industrial de prueba, antes y después de la sustitución del cabezal de combustión del estado de la técnica por el cabezal de combustión de acuerdo con la invención.

Descripción detallada de una forma de realización de la invención

[0024] Como resultado de los experimentos e investigaciones llevadas a cabo por los inventores, fue posible determinar un índice (Índice Geométrico o I_g) y, por lo tanto, un método para evaluar la performance de un quemador, resultando posible redimensionar las características funcionales del referido quemador en el sentido de buscar, de forma simple y práctica, un incremento en su desempeño.

[0025] De acuerdo con la presente invención, el método propuesto incluye determinar un índice adimensional I_g , que se calcula mediante la fórmula a continuación:

$$I_g = C \frac{dD_h}{RD_{h_{eq}}} \quad (\text{ecuación 1})$$

en la cual:

d = distancia entre orificios del exterior;

D_h = diámetro hidráulico del canal de aire externo;

R = distancia desde el centro del cabezal de combustión hasta el centro Del canal de aire externo;

$D_{h_{eq}}$ = diámetro hidráulico anular equivalente al área del canal de aire externo; y

C = constante.

[0026] A través el índice (Ig) acá propuesto, es posible variar selectivamente los diversos parámetros constructivos del quemador en dimensionamiento, así como sus parámetros funcionales, de modo a obtener una respuesta simple, práctica y directa de la expectativa de eficiencia funcional del quemador. En este caso, suele resaltar que el índice propuesto es un medio auxiliar de evaluación, pero que no está destinado a suprimir los estudios a través de modelos matemáticos, como es bien sabido complejos.

[0027] Por ejemplo, en un proyecto en desarrollo, es posible utilizar el índice Ig para adecuar el número de orificios de una determinada alimentación (por ejemplo, de aire primario). Los ensayos prácticos demostraron que, utilizando tal índice, realmente se obtiene un incremento en el volumen de aire secundario que es aspirado por el quemador, una vez que la distribución propuesta revela un mejor índice Ig.

[0028] En particular, el método de la presente invención comprende las etapas de:

- diseñar un quemador de acuerdo con las necesidades operativas del horno;
- calcular el índice Ig del quemador, de acuerdo con las características del diseño establecido;
- incrementar la performance del quemador mediante la variación de los parámetros constructivos del quemador y el recalcu del índice Ig para la disposición constructiva alternativa; y
- utilizar el quemador cuya disposición presente el mejor índice Ig.

[0029] Específicamente, ya estando definidas las características operativas y físicas de un determinado horno rotatorio para la producción de cemento, es posible determinar cuáles son los parámetros de funcionamiento del quemador responsable por la clínkerización de la mezcla alimentada en referido horno. Llevando en consideración estas características, los diseñadores establecen, entre otras, una o más posibles configuraciones para las boquillas de inyección del combustible y, principalmente, para las boquillas de inyección de los flujos de aire primarios inyectados por las boquillas externa y tangencial. Suele observar que, como se mencionó anteriormente, la configuración adoptada para tales boquillas de inyección es esencial en lo que se refiere al volumen aportado de aire secundario, que a su vez responde por la ignición de la mezcla aire/combustible y por la conformación de la llama resultante.

[0030] A continuación, la configuración propuesta se prueba haciendo uso de la fórmula (ecuación 1), de la cual resulta un índice Ig adimensional y proporcional a la eficiencia del quemador. Por lo tanto, se proponen ajustes

alternativos para la disposición de dichas boquillas de inyección del aire primario, y para cada disposición el índice I_g se calcula de nuevo. De este modo, y como queda claro a los técnicos del arte, la comparación entre los índices I_g calculados se utiliza para seleccionar las mejores configuraciones, así como orientar el desarrollo de otras configuraciones de las boquillas. Obviamente, dentro del proceso de desarrollo de una configuración para las boquillas de inyección de aire y combustible, las primeras alternativas se eligen de acuerdo con los conocimientos del ingeniero responsable por el desarrollo. A partir de esta configuración y del respectivo índice (I_g) determinado, el ingeniero puede variar uno de los parámetros de disposición/configuración de un tipo de boquilla, evaluando una eventual mejora o no, en el índice (I_g) resultante.

[0031] Seleccionada, de esa forma, una configuración, ésta puede ser sometida a una segunda verificación de conformidad, a través de la técnica convencional de CFD.

[0032] Como se desprende de la descripción anterior, la metodología de diseño propuesta agiliza enormemente la etapa de diseño de la configuración del cabezal de combustión de un quemador, o sea, de las disposiciones (número, dimensión y posición) para las diversas boquillas de expulsión de los componentes de la mezcla de combustible.

[0033] Por fin, y como resultado de diversos estudios y simulaciones realizadas por los inventores, fue posible determinar que ciertas características constructivas del quemador, y en particular del cabezal de combustión del quemador, conducen a una mayor eficiencia térmica del sistema, menor influencia del uso en las características de la llama producida, así como mayor control operacional de la llama.

[0034] Las figuras 3 y 4 ilustran, respectivamente, vistas frontal y lateral en sección de un quemador, de acuerdo con la presente invención. Como ya se mencionó anteriormente, el quemador (102) es una estructura multi-tubular concéntrica, formada por tubos (111-115) y entre ellos se definen respectivos canales de alimentación cilíndricos. En el extremo inferior de dicho quemador (102) se prevé un cabezal de combustión (120), en el que están perforadas las diversas boquillas de inyección del combustible y del aire primario (AP), mientras que en el extremo superior del quemador (102) están dispuestos los medios de conexión (no ilustrados) con las fuentes de combustible y de aire primario.

[0035] En lo que particularmente se refiere al cabezal de combustión (120), éste presenta: una primera serie de boquillas (121) de sección circular y destinadas a inyectar un flujo externo de aire primario; una segunda serie de

boquillas (122), con sección en arco anular, destinadas a la inyección de un flujo de aire primario tangencial; una tercera serie de aperturas (123), con sección en arco anular, destinadas a la inyección del combustible y del aire de transporte. Alternativamente y de acuerdo con el estado de la técnica, pueden aún ser previstas, en la dirección radial y en sentido hacia el centro O del quemador, diversas boquillas (124) de inyección de un flujo de aire primario interno, intercaladas con inyectores (125) de combustible líquido y, centralmente, una apertura (126) para la inyección de residuos sólidos y aire de transporte.

[0036] Además, el cabezal de combustión (12) puede ser definido a través de diversas estructuras anulares concéntricas. Así, y en la posición radial más externa, se define una superficie anular externa (131), en la cual están formadas o perforadas las dichas boquillas (121) de la primera serie de boquillas. En el interior de dicha superficie anular externa (131) se define una superficie anular tangencial, en la cual están formadas o perforadas las boquillas (122) de la segunda serie de boquillas. En el interior de dichas superficies anulares, anteriormente descritas, se definen otras superficies anulares que no son relevantes al alcance de la presente invención, razón por la cual no están indicadas.

[0037] Entre la superficie anular externa (131) y la superficie anular tangencial (132) se prevé una ranura (108') de separación de dichas superficies (véase específicamente la figura 5), cuya función es permitir el desplazamiento relativo entre los tubos (112, 113), como se verá más adelante. Como consecuencia de la presencia de la ranura (108'), el flujo de aire primario tangencial es inyectado, en su gran mayoría, por las dichas boquillas (122) de la segunda serie de boquillas, mientras que una pequeña parte de este flujo tangencial es liberada a través de dichas ranuras (108'). En este punto, es esencial indicar que la parcela mínima del flujo de aire tangencial que escapa por la ranura (108') no compromete la conformación de la llama F, aun considerando que el uso del equipo lleva a un incremento en la dimensión radial de la ranura (108') con el pasar del tiempo.

[0038] Por otro lado, los diversos estudios realizados por los inventores demostraron que la ranura (9'), existente en los cabezales de combustión actualmente en producción y uso (ver la figura 2B), comprometen de forma significativa la conformación de la llama (F), siendo que dicho efecto negativo es exponencialmente ampliado con el pasar del tiempo, o sea, con el incremento de la dimensión radial de la ranura (9') en función del aporte del flujo de aire primario externo a través de la misma.

[0039] De esta forma, y como una primera característica innovadora del quemador (102) de la presente invención, los extremos inferiores del primero (111) y del segundo (112) tubos del quemador (102) están enlazados y definen, entre ellos, mencionada superficie anular externa (131). En particular, entre el primer tubo (111) y el segundo tubo (112) se define un canal (140) de alimentación y conducción del flujo de aire primario externo, que presenta una entrada superior (no ilustrada) y boquillas (121) de inyección en el horno (1), o de salida del quemador (102).

[0040] En lo que se refiere a dichas boquillas (121), también sorprendentemente se ha descubierto que es posible definir un área total anular que inscribe las referidas boquillas (121) y, dentro de esta área, una relación entre las áreas cerradas (superficie cerrada) y las áreas abiertas (de las boquillas 121) y manteniéndose controlada esta relación es posible optimizar la conformación de la llama F producida por el quemador (120) en el interior del horno (1). En particular, y con relación específicamente a la figura 5 (parcial, esquemática y fuera de escala para mejor visualización), es posible definir un área de inscripción (141), la cual está externamente limitada por una circunferencia externa (142), de radio R_e y que tangencia el punto radialmente más externo de cada una de las boquillas (121), y la cual es internamente limitada por una circunferencia interna (143), de radio R_i y que tangencia el punto radialmente más interno de cada una de las boquillas (121). Además, y dentro de esta área de inscripción, (141) es posible calcular un área abierta A_o (que corresponde a la suma de las áreas de cada una de las boquillas (121) multiplicada por el número de boquillas del cabezal de combustión (120)) y un área cerrada A_c (que corresponde al área de inscripción (141) menos el área abierta A_o), cálculo este accesible a cualquier técnico del sector.

[0041] Específicamente, y tal como fue descubierto por los inventores, referida relación entre el área abierta A_o de las boquillas (121) y el área cerrada A_c se limita a: $0,12 < A_o/A_c < 0,27$. En particular, esta relación se limita a: $0,19 < A_o/A_c < 0,25$.

[0042] A través de diversos ensayos por simulación (vía CFD) y ensayos prácticos, permitió que los inventores confirmen la plena viabilidad de la relación establecida, así como, y principalmente, un incremento no viable de ser anticipado en las condiciones operativas del quemador, y por lo tanto del horno (1) en la producción de cemento.

[0043] Por último, y para permitir referido enlace entre las extremidades inferiores de los tubos concéntricos (111, 112), los inventores promovieron la inclusión de una junta de dilatación, tal como se muestra en la figura 4.

[0044] La figura 4 ilustra una vista en sección longitudinal del cuerpo de un quemador (102) de acuerdo con la presente invención. Para efecto de que quede claro, las representaciones de los tubos (113-115) fueron omitidas de la porción inferior (a la izquierda, en la figura 5) del quemador (102). En particular, y como ya se ha indicado, el primer tubo (111), radialmente el más externo, se extiende a partir de una brida (144) hasta la región opuesta, en la cual se fija el cabezal de combustión (120) del quemador (102). La dicha brida (144) sirve para la fijación de los diversos conductos de alimentación del aire primario A_p y del combustible en los diversos canales anulares cilíndricos que se definen entre cada par de ductos adyacentes. En particular, la figura 5 ilustra sólo el canal (140), de conformación tronco-anular y que es lateralmente delimitado por los primeros y segundos tubos (111, 112), inferiormente por dicha brida (144) y superiormente por la pared interna de la superficie anular externa (131) que une el primer tubo (131) al segundo tubo (132). En la forma de realización ilustrada, el mencionado segundo tubo (132) es más corto que el primer tubo (131), es decir, no alcanzando dicha brida (144). En la región entre el extremo superior del segundo tubo (132) y la brida (144) está instalada una junta de dilatación (145), la cual permite un determinado movimiento relativo entre los tubos (131, 132), debido a las diferencias de temperatura operativas. Como es del conocimiento de los técnicos del área, el primer tubo (131) es sometido a una mayor temperatura, en relación al segundo tubo (132), a pesar de la presencia de una cubierta cerámica aislante (146) directamente aplicada alrededor del primer tubo (131). El origen de esta mayor temperatura del primer tubo (131) está en el flujo de aire secundario A_s calentado ($t \approx 1000^\circ \text{C}$), que se desplaza en paralelo a la longitud del calentador hasta entrar al horno (102), así como la radiación emanada de la llama F.

[0045] Alternativamente, el primer tubo (131) puede ser más corto que el segundo tubo (132), el cual se proyecta hasta la brida (144). En este caso, y de forma similar, en el extremo superior del primer tubo (131) se instala la junta de dilatación (145), así también permitiendo un movimiento relativo entre los tubos (131, 132).

Experimentos

[0046] El quemador (102) de la presente invención fue instalado, a título de experimento de campo, en la unidad industrial de Rio Branco de la empresa Votorantim Cimentos, a principios de 2016. En particular, dicha unidad industrial fue seleccionada para los experimentos de campo, una vez que allá existe un quemador de fabricación del solicitante de este pedido de patente, lo que permitió la simple sustitución de su cabezal de combustión por un nuevo de acuerdo con la presente invención. Más específicamente, el cabezal de combustión instalado presenta 18 boquillas (121) para la inyección del flujo de

aire primario (AP) externo, siendo la relación A_o/A_c de 0,228. Además, el referido cabezal de combustión instalado presentaba igualmente 18 boquillas (122) para el flujo de aire tangencial, radialmente alineadas con las boquillas (121), y abiertas en contra la ranura (108'), tal como se muestra en las figuras 3 y 4. Las mejoras y ventajas derivadas del cabezal de combustión, de acuerdo con la invención, pueden ser resumidas en los ítems abajo y justificadas a través de las comparaciones funcionales y operativas indicadas en las figuras de 6 a 11, de la siguiente manera:

- Cristales de C_3S menores, por lo tanto mayor reactividad del clínker y aumento de la resistencia del cemento fabricado;
- Mayor purga de azufre, es decir, menores pérdidas de producción cuando se utilizan combustibles de alto contenido de azufre (petcoque del 6,5% S);
- Aumento de la vida útil del refractario (hasta en un 30%); y
- Horno con operación más estable y con respuesta más rápida a los cambios de parámetros por parte de los operadores.

[0047] En particular, la figura 6 ilustra, en forma de un gráfico interrelacionado, el flujo de aire secundario A_s que es aspirado hacia la región de la inyección de combustible de acuerdo con los planes de control CS, los cuales están a una distancia, respectivamente, de 0,5m (CS1), 1,0m (CS2), 1,5m (CS3), y 2,0m (CS4), medidos a partir de la superficie externa del cabezal de combustión. En concreto, dicho gráfico de la figura 6 compara tres soluciones de configuración de las boquillas (121) para un cabezal de combustión, de acuerdo con la presente invención, definidas por relaciones A_o/A_c de 0,120, 0,228 y 0,356. Además, dicho gráfico de la figura 6 ilustra también los resultados para los flujos de aire secundario obtenidos para un cabezal de combustión del tipo anular (véase la figura 2C) en los mismos planos de referencia. Tal como se puede apreciar, y en cualquiera de los planes de medición de los flujos de aire secundario A_s , las configuraciones de la presente invención indican un mayor flujo de aire secundario aspirado hacia la región de la inyección de combustible y, por lo tanto, resultando en una mejor conformación de la llama F y una quema más eficiente del combustible introducido por las aperturas (123).

[0048] Tal hecho puede apreciarse mejor en las figuras 7A y 7B, en las que se muestran, a través de ploteos de CFD, la conformación de la llama F y el respectivo perfil de temperaturas para el cabezal de combustión de la presente invención ($A_o/A_c = 0,228$ con 18 boquillas (121) de inyección del aire externo) - Fig. 7A - y para un cabezal de combustión anular (Fig. 7B), de acuerdo con el estado de la técnica. De forma complementaria, las figuras 8A y 8B ilustran los perfiles de temperatura en el interior del horno, que operan respectivamente

con quemadores dotados con un cabezal de combustión de la presente invención ($Ao/Ac = 0,228$ con 18 boquillas (121) de inyección del aire externo) y con un cabezal de combustión anular de acuerdo con el estado de la técnica. Lo que se concluye a través de las imágenes referidas es que la mejor conformación de la llama F lleva a un perfil de temperaturas mejor distribuido y con gradiente más estable en el interior del horno.

[0049] Otra importante consecuencia de la mejor conformación de la llama y del perfil térmico comprobado en el interior del horno está relacionado con el tiempo necesario para alcanzar la estabilización del horno. Para ello, la tabla 1 abajo reporta las fechas en las cuales el horno de la unidad industrial de Rio Branco fue reactivado después de una parada programada. Entre las fechas indicadas en la tabla 1, la primera (enero/16) se refiere a la operación después de la instalación del cabezal de combustión, de acuerdo con la invención. Las demás fechas están relacionadas con los tiempos de estabilización para un quemador de acuerdo con el estado de la técnica.

[0050] Tabla 1 - carga y tiempo de estabilización después de la parada programada.

Tabla 1 – Reactivación después de Parada Programada

Fecha	Estabilización de Alimentación (t/día)	Tiempo de Estabilización (h)
Enero/16	3800	4
Junio/15	3600	12
Septiembre/14	3600	6,5
Enero/14	3420	13,5
Mayo/13	3220	5,5

[0051] Como se puede apreciar, el tiempo de estabilización del horno equipado con un quemador con un cabezal de combustión, de acuerdo con la invención, es sustancialmente menor cuando se compara con los tiempos anteriormente obtenidos. Además, y a través del empleo del quemador de la invención, fue posible incrementar la carga de material tratado por el horno dentro de la estabilidad. En otras palabras, el quemador de la invención permitió una reanudación más rápida y mayor productividad del horno en estudio.

[0052] Por último, las figuras 9A y 9B ilustran, también a través de imágenes generadas por CFD, el comportamiento dinámico de las líneas de los flujos primario y secundario obtenido por los cabezales de quema ya mencionados. Lo que se denota del análisis de estas imágenes es una distribución más homogénea del flujo de aire secundario en el cabezal de combustión de la presente invención, así como y principalmente, una mayor penetración del

referido flujo de aire secundario (As) en la región radialmente más interna, de lo que proviene una mejor quema.

[0053] El resultado final puede ser apreciado a través de las figuras 10A y 10B, las cuales son imágenes de los análisis de microscopía del clínker producido por el quemador de la invención y por un quemador del estado de la técnica. Lo que se comprende de la comparación entre las fotografías de las figuras 10A y 10B es que los granos producidos por el horno alimentado por el quemador en experimento se muestran más consistentes en tamaño y distribuidos de forma más homogénea, o sea, indicando una mejora del clínker producido. Este hecho puede ser aún comprobado mediante lo ilustrado en el gráfico de la figura 11. En éste, se ilustran el consumo de energía en la molienda del clínker, después de su enfriamiento. Los valores mostrados en los informes de producción indican una reducción de energía por tonelada de material procesado del orden del 10%.