

COMPORTAMIENTO DE UN LECHO REGENERATIVO APLICADO EN UN SISTEMA REGENERATIVO RADIANTE

Diego Alberto Henao V¹ y Andrés A Amell Arrieta²

Resumen

Se presenta las características de absorción y entrega de calor de un material regenerativo utilizado en las diferentes investigaciones sobre aplicaciones y usos a nivel residencial e industrial de los combustibles gaseosos; es así como se desea mostrar algunos de los resultados obtenidos del comportamiento de este material en el diseño y construcción de un sistema que aprovecha la alta temperatura de salida de los humos de combustión después de que estos realizan un recorrido por un tubo metálico que transmite parte del calor por radiación, para calentar un lecho cerámico (lecho regenerativo), que tiene la capacidad de absorber una parte de calor de los humos para luego ser entregado parte de este a un flujo de aire frío, que hará parte de la combustión. Esta particularidad de regeneración tiene como finalidad incrementar el ahorro de combustible en comparación con otros sistemas. De esta forma se logra verificar a través de un pequeño prototipo la importancia de implementar materiales regenerativos que contribuyan a mejorar las condiciones de funcionamiento de los sistemas de combustión. los diferentes parámetros que inciden en el sistema descrito anteriormente son: la intensidad del ciclo, la temperatura promedio del lecho, la potencia térmica, el factor de aireación entre otro.

Palabras Claves: Radiante, regenerativo, recuperación de calor, gas natural, combustión, eficiencia, transferencia de calor.

Abstract

One appears the delivery and absorption characteristics heat of a regenerative material used in the different investigations on applications and uses from residential and industrial level from gaseous fuels; it is as well as it is desired to show some of the obtained results of the behavior of this material in the design and construction of a system that takes advantage of the high temperature exit of the combustion smoke after these make a route by a metallic tube that transmits part of the heat by radiation, to warm up a ceramic bed (regenerative bed), that has the capacity to absorb a part of heat of the smoke soon to be given to part of this a a cold air flow, that will be part of the combustion. This particularity of regeneration has as purpose of increasing the fuel saving in comparison with other systems. Of this form it is managed to verify through a small prototype the importance of implementing material regenerative that contributes to improve the conditions of operation of the combustion systems. the different parameters that affect the described system previously are: the intensity of the cycle, the temperature average of the bed, the thermal power, the factor of ventilation among others.

Key words: Regenerative, radiant, recovery of heat, natural gas, combustion, efficiency, transfer of heat.

¹ Ingeniero mecánico de la Universidad de Antioquia. Joven investigador de Colciencias y del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Email: grupogas@udea.edu.com.

² Profesor de Ingeniería Mecánica y Coordinador del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Email: anamell@udea.edu.co.

1. Introducción

En nuestro medio debido al poco conocimiento acerca del uso racional de la energía, y la poca implementación de tecnología, ha hecho que no se utilicen eficientemente los recursos energéticos de nuestro país. De esta forma se hace necesario asimilar nuevas tecnologías de conversión energética para adaptarlas al contexto colombiano.

En este contexto el Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas ha venido realizando investigaciones acerca del comportamiento de materiales regenerativos existentes en nuestro medio, con lo que se desea desarrollar metodologías de diseño, adaptables a la escala económica de pequeñas y medianas empresas, a fin mejorar los sistemas de combustión existentes en ellas, como resultado de estos esfuerzos se ha desarrollado un sistema de combustión regenerativo radiante que funciona con una potencia 9.94 Kw y un factor de aireación de 1.05, en el que se verifica la importancia de utilizar materiales regenerativos que aprovechan la energía disponible en los combustibles para los diferentes procesos (Cano y Henao, 2001). El calor transferido de los gases calientes al refractario es almacenado y subsecuentemente transferido al aire de combustión, el cual es de esta manera calentado hasta temperaturas máximas 377.9 °C antes de entrar al quemador de gas (Cano y Henao, 2001).

La necesidad de calentar y/o enfriar fluidos en un proceso de combustión constituye una práctica habitual de los mismos exigiendo para ello un transporte de energía. Para conseguir dicho transporte se utilizan dispositivos de diseño diferentes, tomando como criterio el que se produzca o no acumulación de energía.

Se suele denominar regeneradores o cambiadores de energía aquellos dispositivos donde no se produce acumulación de energía, distinguiéndose entre los de contacto directo en donde las fases fluidas diferentes interaccionan para intercambiar la energía y aquellos otros donde hay un medio que lo impide, pero deja fluir el calor.

Cuando el dispositivo que permite el intercambio de energía junto al método de transporte hacen que se presente acumulación, se le denomina regenerador

de calor. Así un fluido caliente cederá parte de su energía fluyendo durante un periodo de tiempo a través de un medio poroso y sólido adecuado, cediendo a continuación parte de la energía acumulada a otro fluido frío durante un tiempo que puede ser o no igual anterior.

La utilización de los regeneradores es propia para intercambiar energía entre fases fluidas gaseosas, y su posibilidad de aplicación cubre un amplio campo de niveles térmicos, desde temperaturas por debajo de los cero grados centígrados (transporte de energía en los procesos de separación física de los componentes del aire) hasta niveles que giran alrededor de los 1300°C, para precalentamiento del aire, en procesos de combustión donde la temperatura de llama debe ser lo más alta posible (Trilleros y Otero, 1982).

Para establecer el funcionamiento característicos del sistema regenerativo, se examinaron experimentalmente fenómenos relacionados con la combustión, la radiación y el control integrado en el prototipo desarrollado.

2. Características de un sistema regenerativo

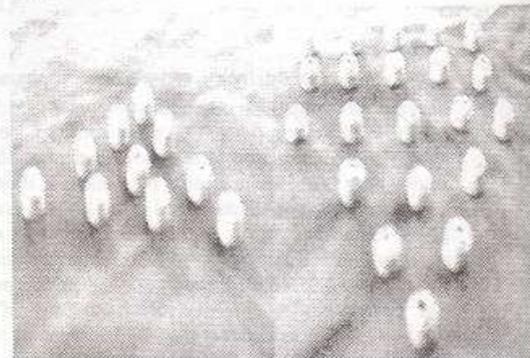


Figura 1. Material regenerativo

El intercambio de calor entre un fluido frío y uno caliente, tiene lugar por enfriamiento de este último mediante contacto directo con un tercer medio sólido que se mantendrá a temperatura intermedia entre ambos, almacenándose calor de forma temporal. De esta forma el medio sólido cede parte

de la energía acumulada al fluido frío por contacto directo, sucediéndose alternativamente periodos de calefacción y enfriamiento del medio sólido. Esta circunstancia hace que en cada periodo se tengan valores constantes de las temperaturas de los fluidos que entran al regenerador, y variables con el tiempo las de salida debido a la disminución del contenido energético del medio.

Los elementos que constituyen el medio sólido presentan distribuciones diferentes de temperatura según que caliente o enfríe el mismo.

Las variantes de flujo posibles de un regenerador dependen de la disposición fija, móvil o giratoria del sólido

Las formas geométricas de los elementos del medio sólido son fundamentalmente la paralelepípeda, esferas y laminas de perfil ondulado. Los materiales de construcción van desde la criolita a temperaturas bajas a los refractarios especiales a temperaturas elevadas, pasando por las aluminas, sílice y aceros especiales. (Trilleros y Otero, 1982)

Las nuevas generaciones de quemadores regenerativos reducen las emisiones de NO_x , CO_2 Y partículas contaminantes y aumentan la eficiencia del sistema, mejorando las condiciones de productividad de estas (Schalles)(Caddet).

Para una eficacia alta de calor transferido se requiere que los coeficientes de transferencia de calor y el área del refractario, sean grandes (Figura 1). Esto significa que el flujo de masa de gases a través de los conductos en el refractario debe ser lo más alto posible, pero con una caída de presión satisfactoria. (Pritchard)

3. Descripción del prototipo

Un sistema regenerativo radiante es una combinación de un lecho regenerativo y de un tubo radiante que transmite calor por radiación. Se presenta bajo la forma de un sistema compacto y consta de una pareja de quemadores que funcionan cíclicamente de tal manera que cuando uno actúa como quemador (producción de energía), el otro expulsa los gases de combustión para el calentamiento del lecho. En cada quemador se encuentra un sólido regenerativo, funcionando en cada ciclo como un intercambiador de calor de tipo gas/sólido (recupera el 90% del calor

contenido en los humos) y como un sólido/gas (precalienta el aire de combustión cediendo más del 60% del calor contenido en los gases de combustión) (Serie Tecnológico Energética, A-1).

La Figura 2 es una representación del prototipo desarrollado, la secuencia de funcionamiento de este tipo de sistema de combustión puede describirse en los siguientes términos:

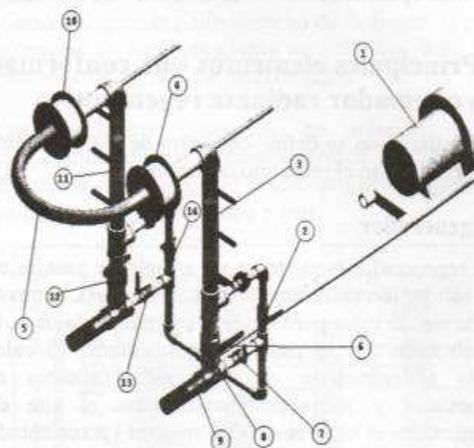


Figura 2. Sistema regenerativo radiante

Lo primero es encender el ventilador centrífugo (1), que se mantendrá encendido todo el tiempo de funcionamiento. Luego se elige cuál de los dos lados va a realizar el modo quemador; para esto se requiere cerrar las válvulas (12 y 13), ajustar la válvula (14) de tal forma que el suministro del caudal sea el adecuado para mantener las emisiones de humos dentro del rango previamente establecido, luego se abre la válvula de suministro de gas y se genera el arco eléctrico en la zona (10), para encender el quemador.

Como se ha mencionado con anterioridad, cuando uno de los lados está realizando la operación de modo quemador el otro lado debe estar realizando la operación de modo eyector, para este ejemplo el modo eyector lo está realizando el lado izquierdo. En este modo se deben abrir completamente las válvulas (6 y 7) y cerrar la válvula (2), es así como el flujo de humos que provienen del quemador de la zona (10) pasa por el tubo radiante (5) y por el lecho regenerativo (3), en este modo de operación el flujo de aire proveniente del ventilador se descarga por

medio de la boquilla (8) hacia el eyector (9) lo que produce el vacío necesario para arrastrar los humos por el lecho regenerativo (3) y así descargados los humos diluidos con aire hacia la atmósfera. Cuando se cumple un ciclo de funcionamiento, se intercambian los modos de operación para cada uno de los lados del prototipo, llevándose a cabo las mismas operaciones.

4. Principales elementos que conforman un quemador radiante regenerativo

A continuación se define cada uno de los elementos que conforman el prototipo desarrollado:

Regenerador

Un regenerador consiste en un arreglo de pasajes en un sólido, formando una matriz refractaria, a través de la cual el calor perdido de los gases y el aire de la combustión frío se pasan alternadamente. El calor dado al refractario de los gases calientes es depositado y subsecuentemente pasa al aire de combustión el cual es de esta manera precalentado antes de entrar al quemador de gas. Tiene la propiedad de absorber y entregar calor rápidamente.

Eyector

Este se encarga de realizar un fenómeno de succión de humos a través del lecho, debido al efecto de vacío producido por el suministro de aire en el inyector hacia una zona convergente (mezclador) (Pedroni, 1979).

Sistema radiante

El sistema radiante está conformado por un tubo radiante de sección circular a alta temperatura, el cual transfiere una considerable cantidad de calor a sus alrededores por el método de radiación, de aquí que se pueda hablar de tubos radiantes eléctricos y quemadores de tubos radiantes, y además se tienen clasificados como equipos de calentamiento indirecto (Association Techbique de L'Industrie de Gaz en France, 1983).

Quemador a gas

El diseño del quemador a gas utilizado en el prototipo tiene como base las características de un

quemador a rotación, en el cual el suministro de gas se realiza de manera axial, en este se requiere de un elemento generador de turbulencia para efectuar la mezcla de aire / gas, una cabeza estabilizadora de llama y de un sistema de ignición encargado de generar el arco eléctrico. Para el caso del quemador diseñado el suministro de gas se realiza con un par de inyectores ubicados de tal manera que el flujo de gas es perpendicular al flujo de aire, con lo cual no se hace necesario el uso de un generador de turbulencia, pero si de la cabeza estabilizadora de llama. En la Figuras 28 y 29 se muestra en detalle la configuración del quemador y de los estabilizadores de llama (Amell y otros, 1998), (Association Techbique de L'Industrie de Gaz en France, 1983).

5. Funcionamiento del sistema regenerativo radiante

Como ya se ha dicho, estos sistemas tienen dos modos de operación: modo quemador y el modo eyector. Estos modos de operación son los que se repiten en cada ciclo de funcionamiento del sistema regenerativo radiante:

Modo quemador

Este modo de funcionamiento lo que representa es que uno de los quemadores del prototipo se encuentra encendido, y el flujo de aire caliente proviene del lecho regenerativo.

Modo eyector

En este modo mientras que uno de los lados se encuentra realizando la operación del modo quemador, el otro se encuentra arrastrando los humos de la combustión después de su recorrido por el tubo radiante, hacia el lecho regenerativo y posteriormente evacuándolos hacia la atmósfera.

Evaluación de prototipo

Para caracterizar el material regenerativo utilizado en el prototipo, se realizaron varias pruebas de laboratorio, que permitieron analizar los siguientes aspectos para diferentes condiciones de funcionamiento y geometría del sistema regenerativo (figura 3):

1. Evaluación de la temperatura de calentamiento del aire.
2. Evaluación de la de los humos calientes, antes y después del lecho regenerativo.
3. Condiciones regenerativas del material cerámico.
4. Evaluación de las emisiones del prototipo.

6. Resultados

la caracterización del material regenerativo depende de la evaluación de los siguientes parámetros:

1. La temperatura de los humos de combustión antes y después del lecho regenerativo,
2. Las temperaturas de calentamiento del aire.
3. La temperatura del lecho regenerativo.

Tabla 1. Puntos de medición de temperatura de acuerdo a los modos de operación.

Puntos de medición de Temperaturas		
T1	T2	T3
Temperatura de los humos antes del lecho	Temperatura del lecho	Temperatura de los humos después del lecho

Los puntos de evaluación de estas temperaturas se ilustran en la Figura 3.

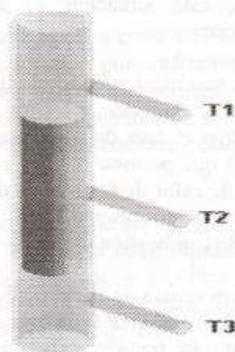


Figura 3. Puntos para la medición de temperaturas.

Para la elaboración de estas pruebas se establecieron condiciones de funcionamiento relacionadas a la variación de potencia, geometría del material regenerativo y el ciclo de funcionamiento.

Se utilizaron dos tipos de geometría de material regenerativo (en la figura 1 se aprecia esta geometría), que fueron lasificados como material pequeño (lado izquierdo de la figura 1) para potencias de funcionamiento de 6.81 Kw y 9.94 Kw y material grande (lado derecho de la figura 1) para potencias de funcionamiento de 5.97 Kw, 8.82 Kw para efectos de análisis de resultados.

Los resultados obtenidos en relación a la temperatura de los humos calientes considerando diferentes parámetros de funcionamiento se ilustran en las figuras cuatro, cinco y seis.

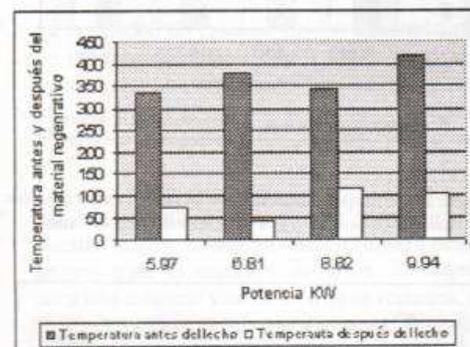


Figura 4. Comportamiento de la temperatura de los humos calientes para un ciclo de 40 segundos.

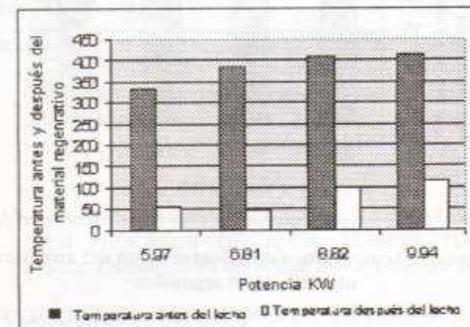


Figura 5. Comportamiento de la temperatura de los humos calientes para un ciclo de 60 segundos.

Observando los gráficos cuatro, cinco y seis y teniendo en cuenta las diferencias de temperatura de

los gases entre la entrada y la salida del material o lecho regenerativo dada una potencia en un ciclo determinado, descriptas en la tabla dos. Se observa como el material regenerativo absorbe una mayor cantidad de calor para una geometría pequeña, ciclos menores de funcionamiento y mayores potencias, con lo cual se logran mayores temperaturas de calentamiento del aire de combustión.

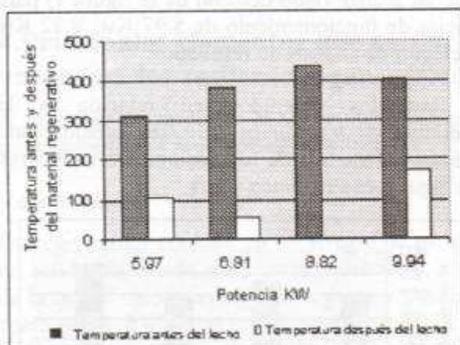


Figura 6. Comportamiento de la temperatura de los humos calientes para un ciclo de dos minutos

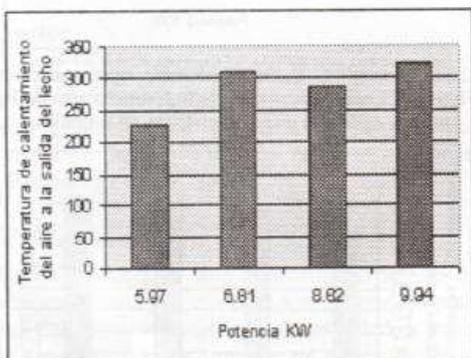


Figura 7. Temperatura de calentamiento del aire para un ciclo de 40 segundos.

Los resultados obtenidos en relación a la temperatura de calentamiento del aire a la salida del material o lecho regenerativo se ilustran en las figuras siete y ocho.

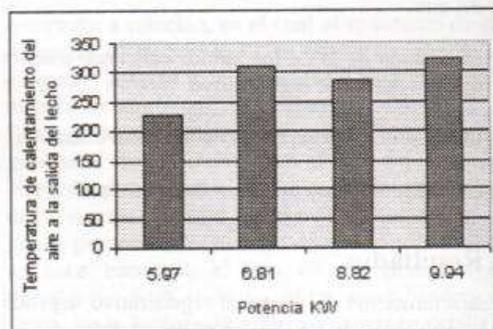


Figura 8. Temperatura de calentamiento del aire para un ciclo de 120 segundos.

Tabla 2. Diferencias de temperaturas para diferentes potencias y geometría de material regenerativo.

Ciclo seg	Potencia Kw				Geometría
	5.97	6.81	8.82	9.94	
40	266		282.4		Grande
		332.3		314	Pequeño
60	276		310.3		Grande
		339.8		299	Pequeño
120	206		333.4		Grande
		324.7		229	Pequeño

De acuerdo con la información que proporcionan las figuras siete y ocho. Para diferentes condiciones de funcionamiento, se observa que se da un mayor calentamiento del aire cuando se tiene menor duración del ciclo, mayores potencias de funcionamiento y una geometría pequeña del lecho regenerativo, esta situación se explica por las siguientes razones:

1. Debido a que manteniendo el volumen del lecho constante y tamaño menores del material regenerativo el área de transferencia de calor es mayor, lo que permite retener y entregar mayor cantidad de calor de los humos de combustión al aire que posteriormente será utilizado en el proceso de combustión.
2. A mayor potencia se tiene mas calor disponible en los humos y mayor flujo másico con lo cual se incrementa la transferencia de calor hacia el lecho regenerativo.

3. A menor duración del ciclo de operación se tendrá menor disipación de calor desde el lecho hacia los alrededores.

7. Determinación de la rata de aireación

Con la composición de O₂ y CO₂ en los humos secos y aplicando el software Combugas del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas se determinó el factor de aireación en cada ensayo, en la Figura 9 se presentan los resultados obtenidos, como puede observarse siempre se obtuvieron combustiones con un bajo exceso de aire. Para estas condiciones la composición promedio de los gases de combustión fue: O₂ 1.48%, CO 0.048 %, CO₂ 11.03 % y CH₄ 0.018%, obteniéndose en cada ensayo una combustión de buena calidad.

8. Conclusiones

1. En un sistema de combustión con regeneración las variables principales a tener en cuenta para el diseño y operación óptima de este, dado un material con propiedades regenerativas son: el tiempo de duración del ciclo, la geometría del material regenerativo y la potencia térmica. Cuando el ciclo de operación se disminuye, la geometría del material se disminuye y la potencia se aumenta, la cantidad de calor recuperado es mayor y la temperatura de calentamiento del aire de combustión se eleva con lo cual se obtiene mayor eficiencia de combustión y mayor ahorro energético.
2. El intercambio de calor entre un fluido frío y uno caliente tiene lugar por enfriamiento de este último, lo cual es posible mediante el uso de un tercer elemento de constitución sólida, que tiene la propiedad de almacenar calor en forma temporal.
3. La capacidad que tiene un material regenerativo de absorber y entregar calor rápidamente, incide directamente entre otros aspectos en el ahorro de combustible utilizado para un proceso de combustión, es decir entre mayor sea el calentamiento del aire mayor será el ahorro energético, está disminución en el consumo de

combustible se ve reflejada especialmente en factores económicos.

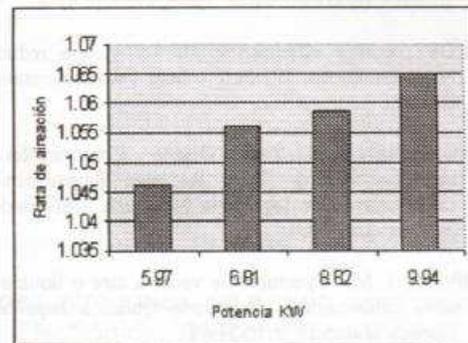


Figura 9. Factor de aireación para diferentes potencias de funcionamiento.

4. La necesidad de calentar fluidos como el aire en un proceso de combustión a fin de mejorar las condiciones de operación de estos sistemas, hace necesario el estudio de materias primas con propiedades regenerativas existentes en nuestro medio.
5. La implementación de nuevas tecnologías en nuestro medio, involucra utilizar nuestra materia primas para la creación de estos. Se requiere para ello estudiar y analizar dichos recursos, con el fin de establecer sus propiedades de radiación y regeneración como en este caso.

Referencias

- AMELL, A. et al., Tecnología de la combustión de los gases, Modulo 4 y 5: Quemadores atmosféricos con llama de premezcla y Quemadores de aire inductor. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Centro de Extensión Académica CESET, Medellín, 1998.
- APLICACIONES AVANZADAS DEL GAS NATURAL EN PROCESOS DE ALTA TEMPERATURA. Serie Tecnológico-Energética, Serie A-1.p. 25-29
- ASSOCIATION TECHNIQUE DE L'INDUSTRIE DE GAZ EN FRANCE. Calcul, conception et utilisation de bruleurs industriel a gaz. Collection de techniques gazières, troisième partie. Paris, 1983. P.119.
- ASSOCIATION TECHNIQUE DE L'INDUSTRIE DE GAZ EN FRANCE. Calcul, conception et utilisation

de bruleurs industriel a gaz. Collection de techniques gazières. Deuxième partie. Paris, 1983. p. 81-87.

CADDET, energy efficiency. Burner system reduces NOx, emissions, JP. Full - time Fdi Regenerative Burner

CANO, C, HENAO, D. Tesis: "Diseño y Construcción de un Quemador de Tubo Radiante Regenerativo" Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Antioquia. 2001.

PEDRONI, J. M. "Eyectores de vacío a aire o líquido y otras aplicaciones". Ingeniería Química Española. Madrid. Marzo 1979. P. 71-78.

PRITCHARD, R. J, Guy. Handbook of industrial gaz utilization. "methods of heat recovery", p. 457-469.

TRILLEROS, J. A. OTERO DE LA GANDARA Jose L. "Regeneradores de Calor. Fundamentos de Transporte de Energía". Departamento de Metalurgia. Universidad Complutense. Ingeniería Química. Mayo 1982. Madrid.

SCHALLES, D. G "The nex generation of combustion technology for aluminun melting". Bloom Engineering Company, Inc. 5460 Homing Road. Pittsburg, Pensylvania..