

DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA REGENERADORES TÉRMICOS

THERMAL REGENERATOR TEST BENCH DESIGN

LAURA CATALINA VILLA SILVA

I.M., Estudiante de Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia. lcvilla@udea.edu.co

RICARDO MEJÍA ÁLVAREZ

I.M., Msc en Ingeniería Energética. Profesor Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. rimejal@udea.edu.co

JHON RAMIRO AGUDELO S.

I.M., PhD en Ciencias Térmicas. Profesor Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. radian@udea.edu.co

Recibido para revisar 05 de Mayo de 2005, aceptado 1 de Noviembre de 2005, versión final 3 de Marzo de 2006

RESUMEN: Este artículo ilustra la metodología seguida para el diseño de un banco de pruebas para regeneradores térmicos de lecho poroso empacado -RTL-, que suministra gases a una temperatura preestablecida de forma estable. El banco cuenta con dos líneas principales para su funcionamiento: una de gases calientes y otra de aire de enfriamiento, cuyo flujo es conducido a un falso RTL mientras el sistema estabiliza. Al lograr esta condición, se conmuta el RTL y se inicia el registro de temperaturas de forma automática.

Los resultados experimentales permitieron obtener el comportamiento real de la temperatura en un lecho empacado con 10 esferas, lo que se utilizó para validar un modelo matemático desarrollado para este tipo de regeneradores.

PALABRAS CLAVE: Banco de pruebas, Regenerador térmico, Diseño conceptual

ABSTRACT: This paper shows the methodology adopted to design a test bench for porous packed bed thermal regenerator -RTL-. The test bench here designed, supply a constant and stable set temperature. The test bench is dotted with a hot gasses line and a cold flow air line, which is conducted to the false RTL while the system is stabilized. When this condition is satisfied, the RTL is commuted and automatically the temperatures are registered.

Experimental results let us obtain the real temperature distribution of a ten spheres packed bed. These results were used to validate a mathematical model of a similar regenerator.

KEY WORDS: Test bench, Thermal regenerator, Design

1. INTRODUCCIÓN

En el laboratorio de metalúrgica de la Universidad de Antioquia existe actualmente un horno de cubilote integrado en una planta piloto eco-eficiente. Una fracción del calor de los gases de escape se recupera en dos regeneradores de lecho poroso empacado. El calor recuperado se transfiere al aire que se suministra a la combustión, mejorando de esta manera el rendimiento del proceso productivo. El conocimiento detallado de los fenómenos

termodinámicos al interior del lecho permitiría realizar mejoras adicionales sobre la recuperación del calor, en esta dirección, se han desarrollado modelos matemáticos con diferentes grados de complejidad entre los que se destacan los de Mejía, et al. [1,2], Derkx y Dixon [3], Logtenberg y Dixon [4], Nijemeisland y Dixon [5], Dixon [6] Hastaoglu [7] y Chejne, et al. [8]. Para validar dichos modelos se requiere de un regenerador debidamente instrumentado, que además permita el control de variables

críticas de operación como las condiciones del fluido que circula a través de ellos.

Como respuesta a esta necesidad, se diseñó y se construyó un banco de pruebas para regeneradores térmicos de lecho poroso empacado -RTL-, debidamente instrumentado, que permite controlar con precisión las condiciones del fluido que lo atraviesa. Las funciones principales del banco se originaron a partir del principio de operación de la planta piloto y posteriormente, para el desarrollo del diseño conceptual y de detalle se siguieron metodologías de diseño propuestas por Pahl y Beitz [9] y Cross[10].

2. DISEÑO

2.1 Funcionamiento general y alcances

La Figura 1 muestra un esquema de la planta eco-eficiente, en la que puede apreciarse el funcionamiento de los regeneradores (2a y 2b). Los gases salientes de la cúpula (1) van a la válvula (7a) que los dirige a uno de los regeneradores. De esta forma, el calor de los gases de combustión es transferido a los elementos empacados al interior del lecho, hasta que este alcance una temperatura estable.

A continuación los gases pasan a un ciclón (3) y luego con la ayuda de un extractor (5) son evacuados a la atmósfera a través de la chimenea (6). Paralela a esta situación, el soplador (4) dirige el aire de combustión a la válvula (7b), que lo encauza al regenerador libre (2b), que en un tiempo anterior estuvo calentándose, recuperando así el calor almacenado en el regenerador.

Las principales tareas del banco de pruebas consistieron en suministrar al regenerador en estudio gases de combustión para el calentamiento y aire para el enfriamiento. Los dos regeneradores se empaquetaron con esferas. Los gases calientes se generaron mediante la

combustión de gas natural. El sistema controlaba de forma automática su temperatura y caudal. Durante la etapa de enfriamiento solamente se controlaba el caudal de aire.

En consecuencia, el equipo debió dotarse con una retroalimentación continua de las condiciones de temperatura y caudal de los fluidos a la entrada de los regeneradores. Adicionalmente, fue necesario tener un registro continuo de la temperatura en diversos puntos al interior del lecho, tanto en las paredes como en los elementos empacados, así como en dirección radial y axial, con el fin de seguir fielmente el desarrollo del proceso térmico.

Para esta actividad se desarrolló un sistema de adquisición de datos con capacidad para recibir, procesar y almacenar mínimo 100 señales. A esto se sumó la necesidad de estabilizar el sistema térmico antes de acoplar el regenerador, ya que por exigencia de los modelos matemáticos a validar, era necesario que la temperatura de entrada de los gases al lecho permaneciera estable durante todo el proceso de medición.

Debido a la originalidad en el diseño de este banco de pruebas, sus especificaciones técnicas fueron establecidas como respuesta a los requerimientos inherentes a la evaluación de los regeneradores instalados en la planta eco-eficiente (Figura 1). En la revisión bibliográfica, se encontró un banco de pruebas para lechos porosos empacados en el *Laboratorio de transferencia de calor y masa del Worcester Polytechnic Institute (WPI)* [11].

Las condiciones experimentales reportadas en el regenerador del WPI, eran diferentes a las requeridas en el diseño presentado en este trabajo. En el WPI usaban vapor para calentar las paredes laterales del lecho y una corriente de aire para enfriarlo, buscando así generar un calentamiento-enfriamiento en el lecho de acuerdo a sus requerimientos.

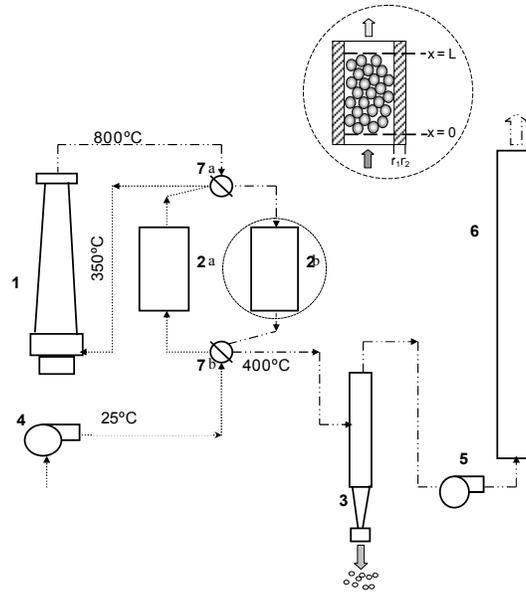


Figura 1 Esquema de la planta Eco-eficiente
Figure 1 Scheme of the Eco-efficient facility

2.2 Diseño conceptual

En el diseño conceptual del banco de pruebas, se adoptó la metodología general de diseño propuesta por Pahl y Beitz [9].

2.2.1 Especificaciones técnicas y de diseño.

Se eligió un regenerador de forma cilíndrica, por comodidad de construcción y por ser ésta una forma comúnmente utilizada en la industria. Con el fin de obtener resultados coherentes con los obtenidos por Dixon y Nijemeisland [12], se empaquetó el lecho con esferas.

Se utilizó gas natural debido a su accesibilidad y economía. El equipo de suministro de aire se dimensionó de acuerdo a la pérdida de presión ocurrida en el RTL, Villa [13]. El rango de operación del banco se estableció teniendo en cuenta la mayor pérdida, la cual corresponde a elementos sucios. Los intervalos de trabajo obtenidos fueron de 0-3 m³/min y de 0-3.5 kPa. La temperatura de trabajo se fijó entre la ambiente 25°C y 600 °C. Por seguridad, la temperatura máxima en las superficies del banco de pruebas se fijó en 40°C.

2.2.2 Establecimiento de funciones.

La función principal del banco de pruebas se denominó: *realizar pruebas en el regenerador* (Figura 2). Además de la presión a la entrada y salida del RTL, se midió la temperatura en diferentes posiciones axiales y radiales en la pared del lecho, así como en los elementos de prueba, tanto durante el calentamiento con gases de combustión, como durante el enfriamiento con aire. Se denominó *funciones secundarias* a las actividades que derivan de la función principal.

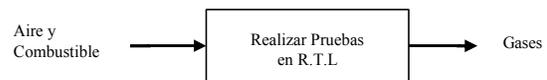


Figura 2 Función general del banco de pruebas
Figure 2 General function of the test bench

Para obtener las funciones secundarias fue necesario identificar todas las tareas que tenían lugar dentro de la función principal (Figura 3).

2.2.3 Establecimiento de soluciones y combinaciones.

Para la generación de alternativas se siguieron los dos primeros pasos comunes a los diferentes métodos de diseño consignados por Cross [10]: listar las funciones secundarias y para cada función mencionar los medios por los cuales

puede realizarse cada función. Los pasos siguientes en general consistieron en la elaboración de un diagrama que incluía todas las alternativas y realizar todas las combinaciones posibles entre ellas. El tercer paso de esta etapa de diseño, consistió en elaborar la Tabla 1, en la que se identificaron las posibles combinaciones que quedaron después de descartar las que tenían grandes desventajas como el alto costo de piezas e instrumentos, la generación de funciones

terciarias complejas y el uso de instrumentos de baja resolución, entre otras.

Las letras indican una combinación posible. Por ejemplo, la solución A consistiría en enfriar gases de forma directa, aislar y permitir el flujo de gases por RTL con el regenerador fijo y el sistema móvil, así como la evacuación de gases por medio de un sistema fijo. Las demás funciones tienen sólo una alternativa y por tanto, son invariantes para las ocho combinaciones posibles (A-H).

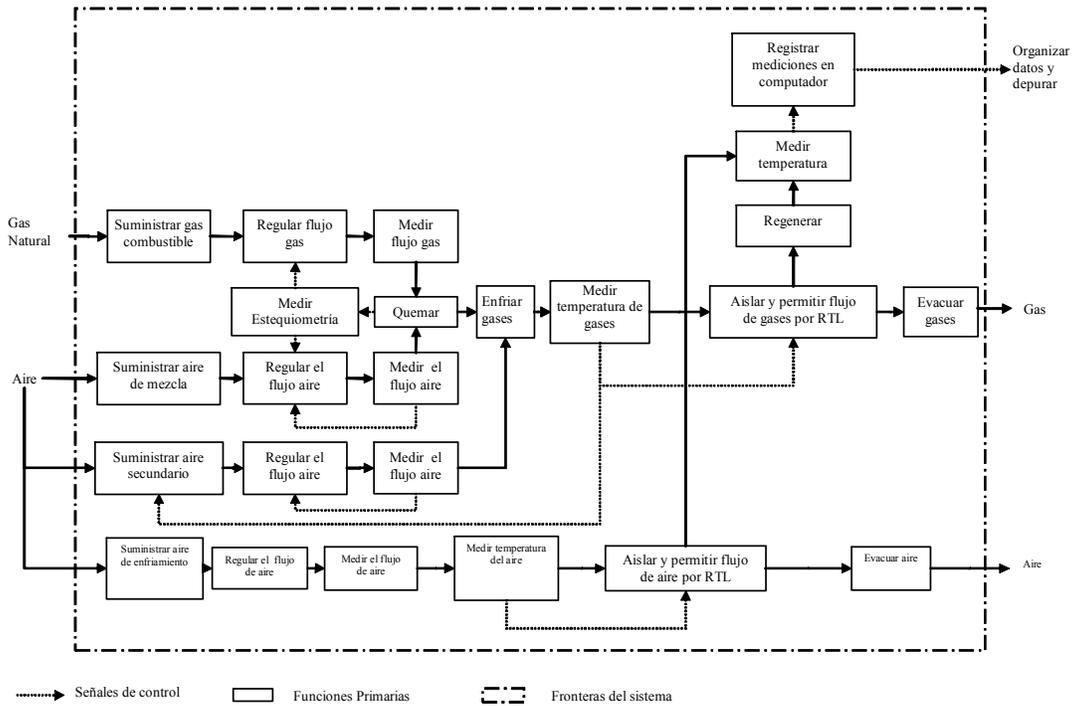


Figura 3 Definición de las funciones del banco de pruebas
Figure 3 Test bench functions definition

Tabla 1 Resumen de alternativas y combinaciones posibles
Table 1 Resume of the possible combinations and alternatives

Funciones secundarias			Alternativas							
			A	B	C	D	E	F	G	H
1	Enfriar gases	Directa (mezclado)	X	X	X	X				
		Indirecta (intercambiador de calor, sin mezcla)					X	X	X	X
2	Aislar y permitir el flujo de gases por RTL	Regenerador fijo y sistema móvil	X				X			
		Regenerador fijo y sistema fijo		X				X		
		Regenerador móvil y sistema fijo			X	X			X	X
3	Evacuar gases	Sistema fijo	X	X	X		X	X	X	
		Sistema móvil				X				X

Tabla 3 Calificación de las combinaciones
Table 3 Evaluation of the combinations

<i>Alternativa o combinación</i>	<i>Parámetro</i>										<i>TOTAL</i>
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>	<i>P7</i>	<i>P8</i>	<i>P9</i>	<i>P10</i>	
<i>A</i>	0	0	6	3	1.5	0.5	2	7	0	8	28
<i>B</i>	0	4	0	3	0	0	2	7	3	0	19
<i>C</i>	9	0	6	3	1.5	0.5	2	7	0	8	37
<i>D</i>	9	0	0	0	1.5	0	2	7	0	8	27.5
<i>E</i>	0	0	6	3	1.5	0.5	2	0	0	8	21
<i>F</i>	0	4	0	3	0	0	2	0	3	0	12
<i>G</i>	9	0	6	3	1.5	0.5	2	0	0	8	30
<i>H</i>	9	0	0	0	1.5	0	2	0	0	8	20.5

2.3 FUNCIONAMIENTO DETALLADO

El banco de pruebas construido (Figura 4) consta de dos líneas de trabajo: la línea de gases calientes y la línea de aire de enfriamiento, las salidas de ambas se localizan en un mismo plano y en el centro de ambas se encuentra un brazo central que soporta el RTL a probar y un falso RTL (un cuerpo de configuración similar al RTL que se opone al flujo del mismo modo). Este último se ubicó sobre la línea de gases de combustión hasta alcanzar estabilidad térmica, posteriormente con un giro manual

de 180° se conmuta al RTL en la línea de prueba y se procede al registro de las mediciones. Cuando el regenerador se encuentra en un estado estable, se gira nuevamente el brazo central - 180°, quedando posicionado el RTL sobre la línea de enfriamiento en la que reposaba

inicialmente. En ese momento se hace fluir aire a temperatura ambiente hasta que se logre nuevamente un estado estable, con lo cual, se termina el registro de mediciones. Las especificaciones del banco se resumen en la Tabla 4 al final de esta sección.

Regenerador térmico. Consiste en un cilindro metálico que contiene un cilindro refractario (cerámico). En este último se localizan los sensores de temperatura distribuidos en cuatro columnas a cuatro diferentes posiciones radiales. Las esferas empacadas al interior se sostienen por medio de una rejilla de acero inoxidable ubicada en la zona inferior del cilindro. Para la sujeción al brazo central del soporte, el regenerador cuenta con un sistema de agarre graduable, que se utiliza cuando se desee probar regeneradores de diferentes tamaños.

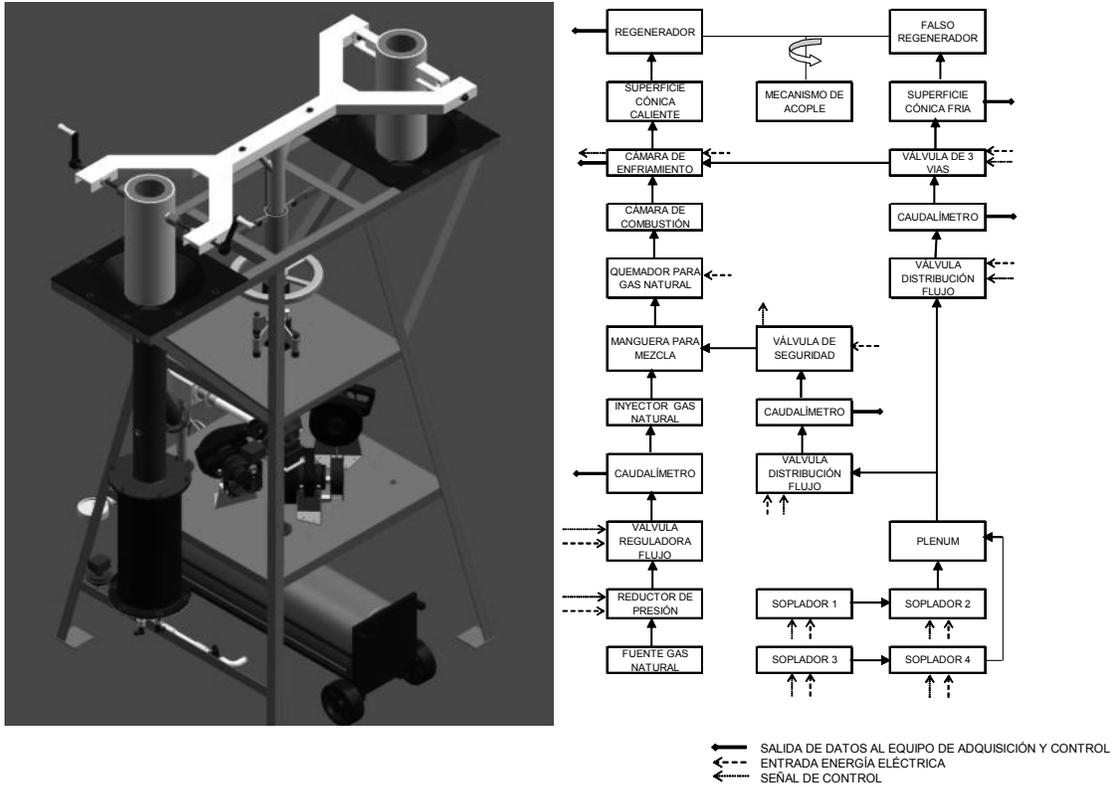


Figura 4 Izquierda: banco de pruebas para regeneradores térmicos. Derecha: secuencia de operación
Figure 4 Left: porous packed bed thermal regenerator test bench. Right: sequence of operation

Suministro de gases. El aire del banco de pruebas es suministrado por un grupo de ventiladores centrífugos, dispuestos en dos series en paralelo que confluyen a un plenum de donde se obtienen dos derivaciones: la primera para la línea de aire primario de combustión y la segunda que se divide a su vez en dos, para el aire secundario y para el aire de enfriamiento en la segunda etapa de funcionamiento. Cada una de estas líneas cuenta con los acoples, medidores de flujo y válvulas necesarias que son controladas por un computador usando los datos registrados en los sensores de temperatura, estequiometría y caudal del mismo banco de pruebas.

Después de mezclar el gas natural con el aire primario, se conduce la mezcla a la cámara de combustión, donde se localiza un quemador con su respectivo equipo de ignición. Luego los gases de combustión pasan a una cámara de enfriamiento, con una entrada extra para el aire secundario, la cual disminuye la temperatura de los gases de combustión al valor que se desee

probar en el RTL. En esta cámara se ubican sensores que registran la temperatura de los gases hasta lograr estabilidad térmica y que además controlan la estequiometría de la combustión.

Acople al RTL. El sistema de acople consiste en un gato hidráulico con un rodamiento ensamblado en la parte superior sobre el cual descansa el brazo central, que soporta al RTL y al falso RTL. El movimiento rotacional del brazo es generado por medio de una volante ajustada directamente a él.

Estructura soporte. Para el soporte de los elementos componentes del banco, se construyó una estructura en forma piramidal, con cuatro superficies básicas de apoyo: Superficie inferior para el soporte de la red de gas, superficie intermedia para el apoyo de la red de aire, superficie alta para el apoyo del mecanismo de acople y una superficie superior extendida para el soporte de las dos superficies cónicas donde se ubican las salidas de las líneas caliente y fría.

Sistema de control y adquisición. El sistema de adquisición se encarga de registrar mediciones de temperatura en gases, en la pared y en los elementos de prueba. Adicionalmente, registra la caída de presión en los tubos venturi ubicados tanto en la línea de gas como en la de aire y la transforma en una señal de caudal. Con estos datos el equipo de control se encarga de accionar automáticamente el conjunto de válvulas o la potencia de los ventiladores a fin de lograr el caudal o la temperatura de trabajo.

- **Control.** El sistema de control manipulaba cuatro variables: flujo, temperatura, presión y concentración de oxígeno en los gases de combustión. El conjunto de ventiladores proporcionaba el flujo de aire adecuado con el fin de lograr la temperatura y el caudal deseados dentro del sistema térmico (actuador). Se utilizó un control PID y un

microcontrolador. La estequiometría se garantizó con un sensor de oxígeno (sonda lambda) y por medio de una válvula de aguja se controló el flujo de gas combustible.

- **Adquisición.** El sistema de adquisición se componía de dos partes, *el sensado de canales análogos*: provisto de circuitería de acondicionamiento, multiplexación, adquisición y transmisión de las señales que se sensaron en el proceso térmico y la *interfaz de usuario*; que permitía el monitoreo y la grabación de la información por medio de una base de datos, que correspondía a los diferentes sensores activos en el momento del funcionamiento, en diferentes sectores del proceso térmico. Se utilizaron 96 canales de temperatura y 48 de presión, con una tasa de muestreo de 2 segundos.

Tabla 4 Especificaciones del banco de pruebas
Table 4 Test bench specifications

Especificaciones			
Tamaños de Regenerador	$Diam_{interior} = 0.082m, 0.152m, 0.210m$	Canales de Adquisición	<ul style="list-style-type: none"> • 96 para temperatura • 48 para presión
Altura de Regenerador	Hasta $2Diam_{interior}$	Fuente de combustible	Cilindro $12.5m^3$ para gas natural
Máxima presión	3.5 kPa	Fuente de aire	4 ventiladores centrífugos de alabes curvados hacia atrás.
Caudal máximo	$3 m^3/min$	Medidores de flujo	Tipo venturi, disponibles en dos rangos para 0-1 psi y para 0-5 psi
Tipo de Combustible	Gaseoso	Aislamiento térmico	Aislamiento de ductos para gases calientes en lana mineral con espesor de $1 \frac{1}{2}$ "
Control de válvulas	Automático	Adquisición de datos	Control de las válvulas reguladoras del banco y almacenamiento de datos mediante PC.
Control de combustión	Automático	Sistema de acople	Compuesto por un gato hidráulico, rodamiento y eje central que soporta el brazo al que se fijan los RTL..
Potencia Quemador	5.3 kW	Elementos disponibles	Esferas de aluminio de 0.034 m de diámetro.
Posicionamiento RTL en línea de trabajo	Manual por medio de volante y gato hidráulico	Sistema de extracción	Descarga libre a la atmósfera

3. EXPERIMENTACIÓN

Para la validación de los resultados experimentales, se realizaron pruebas sobre un RTL de diámetro interior 0.082 m, paredes de cemento refractario y aislante de 0.025 m y con 10 esferas de aluminio de diámetro 0.034 m,

empacadas al interior, tal como se ilustra en la Figura 5. Las esferas se empacaron en cuatro capas: 1, 4, 4, 1, con la segunda capa girada 90 grados con respecto a la primera. Se utilizó esta configuración ya que paralelo a este trabajo se realizaron simulaciones en CFD, Nieto, et al. [14].

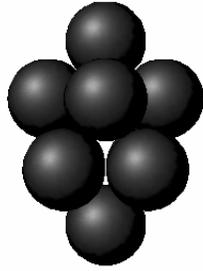


Figura 5 Disposición de los elementos en el lecho.
Figure 5 Packed bed elements disposition.

El RTL se instrumentó con 4 columnas de termopares en diferentes posiciones radiales y dos termopares en las filas intermedias. El análisis de datos se hizo para una de las esferas de la fila intermedia.

Mejía, et al. [1,2] propusieron la ecuación (1) para la temperatura en el elemento inferior del lecho, tanto en el calentamiento como en el enfriamiento:

$$T_e = C_1 + (C_2 - C_1) \cdot \exp(C_3 \cdot t) \quad (1)$$

Donde C_1 , C_2 y C_3 son constantes de ajuste, t es el tiempo y T_e es la temperatura de la esfera.

Para explicar el comportamiento de los datos se asumió la hipótesis nula $H_0: C_1=C_2=C_3=0$. La hipótesis se probó calculando una estadística de prueba. El modelo de ajuste no lineal reportó los resultados consignados en la Tabla 5. Según los cálculos estadísticos, se rechazó la hipótesis nula y por tanto, los coeficientes explican el modelo y fueron dados por los valores de la Tabla 5. Los estadísticos descriptivos del ajuste fueron:

- Desviación estándar de la regresión:
 $\sigma = 0.599749$
- Coeficiente de determinación:
 $R^2 = 0.999903$
- Coeficiente de correlación ajustado:
 $\bar{R}^2 = 0.999902$

Como se cumplió que $\bar{R}^2 \approx R^2$, se concluyó que el tiempo (t) explicaba satisfactoriamente a la variable temperatura T_e .

Tabla 5 Resultados del modelo
Table 5 results obtained with the model

Coeficiente	C_1	C_2	C_3
Valor	343.54	41.63	-0.0029
Error estándar	0.774	0.135	1.32E-05
Estadístico t	443.62	306.77	-225.14
Probabilidad	0	0	0

La prueba de homoscedasticidad [15], reportó los siguientes resultados:

Estadístico- F	4.676679
Probabilidad	0.010255
No. Obs. * R^2	9.094259
Probabilidad	0.010598

Aunque la probabilidad es baja, al examinar los residuos estandarizados en las Figura 6 y 7 pueden descartarse distribuciones anómalas de varianza causadas por una mala especificación del modelo. Como puede observarse, hay una leve pulsación en la distribución de residuales, lo cual es atribuible al escalonamiento de los datos reportado por el equipo de adquisición de datos. El efecto es causado porque el poder de resolución del equipo se fijó en 1°C durante la experimentación, que es suficiente para los niveles de temperatura manejados, pero la prueba de homoscedasticidad es capaz de detectarlo.

La Figura 8 muestra el histograma de frecuencia de residuales con los respectivos resultados de la prueba Jarque-Bera de normalidad [15]. El valor de 0.093294 de la probabilidad de esta prueba, es suficiente para aceptar la hipótesis de normalidad en los residuales.

El anterior análisis de regresión permite concluir que la expresión (2), obtenida por correlación de datos, es un modelo correcto para expresar la temperatura local de sólidos empacados en función del tiempo.

$$T_e = 343.54 + (41.63 - 343.54) \cdot \exp(-2.965 \cdot 10^{-3} \cdot t) \quad (2)$$

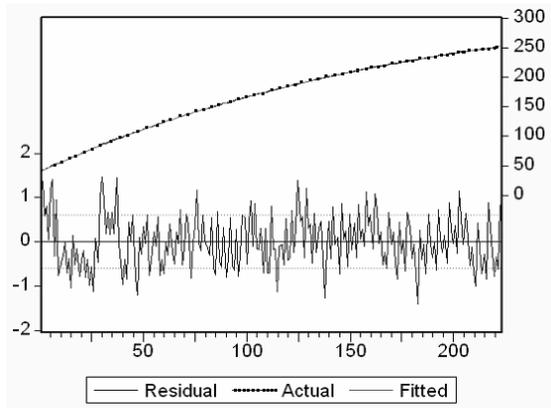


Figura 6 Modelo ajustado y curva de residuos absolutos.

Figure 6 Adjusted model and absolute residuals.

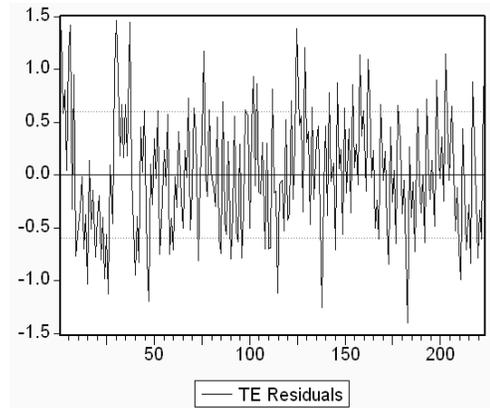


Figura 7 Residuos estandarizados de la regresión no lineal

Figure 7 Standardized residuals from the non linear regression

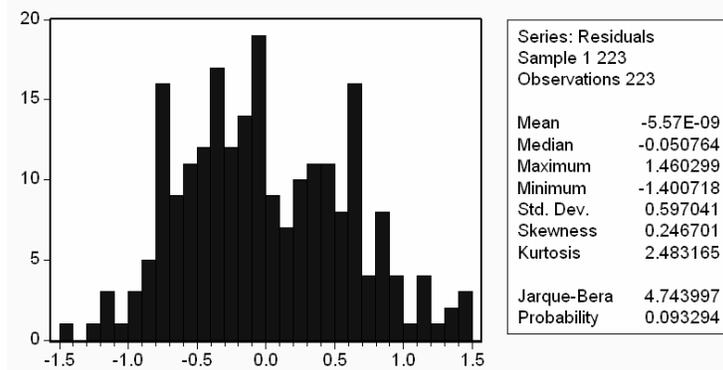


Figura 8 Histograma de residuos para la prueba Jarque-Bera de normalidad

Figure 8 Residuals histogram for the Jarque-Bera normality test

4. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un banco de pruebas que permitió validar un modelo teórico desarrollado para regeneradores térmicos de lecho poroso empacado en estado transitorio.
- Las alternativas de diseño, en la mayoría de los casos eran únicas, y requerían un diseño específico determinado por las condiciones de trabajo, como es el caso de la estequiometría, temperatura y caudal, entre otras. Lo que hizo que la combinación de posibles soluciones se

redujera y que el diseño de detalle tomara un papel substancial en el logro de un diseño final.

- Las distribuciones de temperatura medidas experimentalmente, mostraron una marcada tendencia a describir el fenómeno según las ecuaciones del modelo teórico.
- El banco pudo ser usado con gas natural hasta una temperatura de 600°C y presión máxima de 3.5 kPa, en un futuro podrían hacerse modificaciones que permitieran trabajar con otros combustibles gaseosos.
- El banco puede ser utilizado para realizar prácticas de laboratorio de transferencia de calor, termodinámica y mecánica de fluidos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia, a la Universidad Nacional de

Colombia sede Medellín y a la Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología del Banco de la República de Colombia por la financiación de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] MEJÍA, R, RIVERO, P Y MEJÍA, H.D. Aproximación a la función de distribución de temperatura de un regenerador térmico de lecho empacado, 1. *Revista Facultad de Ingeniería*, Universidad de Antioquia. No. 23 (2001)., pp. 91-102.
- [2] MEJÍA, R, RIVERO, P Y MEJÍA, H.D.. Aproximación a la función de distribución de temperatura de un regenerador térmico de lecho empacado, 2. *Revista Facultad de Ingeniería*, Universidad de Antioquia. No. 25, (2002), pp. 60-69.
- [3] DERKX, O.R. Y DIXON A.G.. Determination of the fixed bed wall heat transfer coefficient using computational fluid dynamics. *Numerical Heat Transfer, Part A*. Vol. 29, (1996), p. 777-794.
- [4] LOGTENBERG, S. Y DIXON .A.G.. Computational fluid dynamics studies of fixed bed heat transfer. *Chemical Engineering and Processing*. Vol. 37, (1998), p. 7-21.
- [5] NIJEMEISLAND, M. Y DIXON A.G.. Design of a wall-segment model of an N=4 fixed bed of spheres and simulation of gas flow and heat transfer. *North American FLUENT Student Contest*. (2002).
- [6] DIXON, A.G. (1997). *Heat transfer in fixed beds at very low (<4) tube to particle diameter ratio*. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. Vol. 36 p. 3053-3064.
- [7] HASTAOGLU, M.A.. Transient modelling of a packed tower: Mass and heat transfer with reaction. *Fuel*, Vol. 74, No. 11, (1995), p. 1624-1631.
- [8] CHEJNE, F., RUIZ J.C. Y BADIE J.M.. Mathematical model for energy saving in induration of iron ore pellets. *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 23, No. 5, (1996), p. 406-410
- [9] PAHL, G. Y BEITZ, W.. *Engineering Design a systematic approach*. Segunda edición, (1988). The Design Council. Londres. 392p.
- [10] CROSS, N. *Métodos de Diseño, Estrategias para el Diseño de Productos*. Limusa Wiley. 2002. 190p.
- [11] WPI (Worcester Polytechnic Institute). [www.wpi.edu/Academics/Depts/ChemEng/Resarch/](http://www.wpi.edu/Academics/Depts/ChemEng/Research/).
- [12] DIXON, A.G. Y NIJEMEISLAND M.. CFD as a design tool for fixed-bed reactors. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. Vol. 40, (2001), p. 5246-5254.
- [13] VILLA, L.C.. *Diseño, construcción y puesta a punto de un banco de pruebas para regeneradores térmicos de lecho poroso empacado*. 127 p. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. (2003).
- [14] NIETO, C., MEJÍA, R. Y AGUDELO, J.R.. Dinámica de fluidos computacional aplicada al estudio de regeneradores térmicos. *Revista Dyna* No. 143. (2004), pp 81-93. Medellín.
- [15] MONTGOMERY, D.C. Y RUNGER, G.G. (1996). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. McGraw Hill