

Análisis termodinámico de un horno tipo colmena

Thermodynamic analysis of a beehive-type furnace

Díaz Romero, Carlos Sebastián¹; Porras Velásquez, Diego Armando¹ y Sanabria Muñoz, María Juliana²
Fundación Universitaria de San Gil - UNISANGIL, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería
Programa Ingeniería de Mantenimiento
San Gil, Colombia

carlosdiaz3@unisangil.edu.co
diegoporras@unisangil.edu.co
msanabria@unisangil.edu.co

Fecha de recepción: mayo 10 de 2018
Fecha de aceptación: febrero 08 de 2019

Resumen — Este artículo trata sobre el comportamiento termodinámico presente en un horno tipo colmena de la Ladrillera Versalles de Ramírez Hermanos Ltda., con el propósito de establecer la eficiencia térmica del horno tipo colmena mediante el modelamiento térmico de la temperatura que maneja en las diferentes etapas de cocción de los ladrillos y otros productos a base de arcilla que se fabrican en la planta de producción. Para el desarrollo de este proyecto se realizó la caracterización del horno tipo colmena y el balance termodinámico, teniendo en cuenta los factores que afectan directa o indirectamente y las características que influyen en el proceso de cocción de piezas a base de arcilla, como lo son las características del producto al entrar, el consumo de carbón del horno, las temperaturas que se presentan en la cocción, el comportamiento del carbón y la composición de los gases de escape. Se documentó el monitoreo de las temperaturas por medio de dos sistemas, por termocuplas tipo k y conos pirométricos, con el fin de conocer la temperatura ideal para la cocción de ladrillos y piezas de arcillas. A partir de los resultados obtenidos, se determina la eficiencia que presenta el horno tipo colmena de la empresa.

Palabras clave— Balance termodinámico, carbón, conos pirométricos, eficiencia energética, horno colmena.

Abstract - This article is about the thermodynamic behavior existing in a beehive-type furnace at 'Ladrillera -brickworks- Versalles de Ramírez y hermanos Ltda'. Its purpose is establishing the thermal efficiency of a hive-type furnace by means of the thermal modeling of the temperature that exist in the different stages of bricks firing and other clay based products that are manufactured at the brickworks. For the development of this project, a characterization of the beehive-type furnace and a thermodynamic balance were

made, taking into account the factors that directly or indirectly affect them, besides the characteristics that influence the process of firing clay based pieces, such as features of the product when getting inside the furnace, its coal consumption, the temperatures that appear in the firing process, the behavior of the coal and the composition of the exhaust gases. Temperature monitoring was documented by means of two systems: by type-k thermocouples and by pyrometric cones, in order to know the ideal temperature for firing bricks and pieces of clays. Based on the results, the efficiency of the company's beehive-type furnace is determined.

Keywords - Thermodynamic Balance, Coal, Pyrometric Cones, Energy Efficiency, Beehive-type furnace

I. INTRODUCCIÓN

La industria ladrillera y de productos cerámicos se realiza mediante una serie de fases básicas, las cuales son: la extracción y preparación de las materias primas, el procesamiento de las mismas, y la obtención de los productos terminados, fase final que resulta ser la de mayor interés, dado que, a partir de ahí, se obtiene el producto. Por ello, para llevar a cabo esta fase se requiere exponer los productos crudos a altas temperaturas para su cocción mediante la combustión, implementando principalmente carbón en los hornos tipos colmena como fuente de combustible para generar la energía requerida y completar el proceso.

¹ Ingeniero de Mantenimiento, UNISANGIL

² Ingeniera Mecánica, Docente programa Ingeniería de Mantenimiento, Coordinadora semillero de Investigación en Energía Renovables RESD, UNISANGIL.

Actualmente en la empresa Ladrillera Versalles de Ramírez y Hermanos Ltda. el proceso de cocción se realiza en hornos túnel y tipo colmena mediante la combustión de carbón, ya que este tipo de hornos son cerrados, intermitentes y cilíndricos de tiro natural con chimenea invertida, trabajan de una manera poco eficiente energéticamente ya que dependen en gran parte de la pericia de los operarios encargados de la quema. En la figura 1 se sintetiza el proceso de fabricación de los ladrillos.



Fig. 1 Diagrama del proceso para la fabricación de ladrillos.

Para la elaboración de los ladrillos y tejas se utilizan arcillas extraídas de terreros cercanos a la planta, las cuales tienen en su composición química: sílice, aluminio, oxígeno, hidrogeno, potasio, magnesio, hierro y amonio. Uno de los inconvenientes que presentan este tipo de hornos es la variación de temperaturas dentro del mismo, debido a su forma de construcción, y la disposición lateral de las hornillas, generando temperaturas más alta en unas zonas que en otras, lo cual conlleva a una cocción no uniforme de todos los ladrillos dentro del horno, provocando una gama de tonos en los ladrillos por la disipación de la temperatura que se presenta desde la cúpula hasta la base del horno dando como resultado una mayor temperatura en la cúpula y una menor en la base del horno. Cabe mencionar que un inconveniente muy importante resulta ser, el desconocimiento de la temperatura exacta de cocción de los ladrillos la cual varía de una quema a otra.

En la industria ladrillera es de gran importancia el proceso de cocción de sus productos, ya que en él se obtienen: características de dureza, textura y color deseado. Motivo por el cual, la relevancia de conocer el comportamiento termodinámico de los hornos tipo colmena, resulta ser importante, ya que a partir de dicha información se pueden establecer: la temperatura y tiempos ideales de cocción de los ladrillos y tejas de arcilla.

Este proyecto se desarrolla con el propósito de conocer el comportamiento térmico presente en el horno colmena y así lograr un mayor rendimiento y mejor competitividad en el mercado de la empresa Ladrillera Versalles de Ramírez y Hermanos Ltda.

II. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se llevó a cabo una serie de etapas, las cuales tuvieron como propósito la toma de los datos necesarios mediante una investigación tipo

exploratoria, en las instalaciones de la Ladrillera Versalles de Ramírez Hermanos Ltda. Con los datos tomados durante la investigación se realizó la descripción del fenómeno fisicoquímico, el cual se basa en el modelamiento térmico de un horno tipo colmena, en el proceso de cocción de ladrillos y tejas de arcilla.

En la figura 2 se presentan el flujograma del proceso de cálculos para el balance térmico, en el que se integran datos de entrada, procedimiento y datos de salida en el proceso de cocción de ladrillos y tejas de arcilla.



Fig. 2 Flujograma del proceso de cálculos para el balance térmico.

III. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UN HORNO TIPO COLMENA

A) Caracterización del horno colmena

Los hornos colmena, también conocidos como hornos redondos de llama invertida, son hornos cerrados e

intermitentes, en los cuales se puede regular mejor el tiro. Puede ser natural o forzado. La alimentación del material seco se realiza por una puerta lateral. El suministro del combustible puede realizarse manualmente mediante hornillas laterales en la pared del horno. Están contruidos en forma de cámaras circulares con paredes y techo en bóveda de ladrillo. Una ventaja de estos hornos es que el combustible y sus residuos no están en contacto directo con el producto debido a la pared separadora y conductora de gases del hogar. La bondad de esta ventaja radica en que la coloración de los productos presenta tonalidades rojizas muy homogéneas y no se presentan productos manchados por efectos del humo ni de las cenizas. Los gases de combustión ascienden entre la pared del horno y la pared frontal del hogar, llegando hasta la bóveda (parte superior del horno) y luego son obligados a salir por la parte inferior del horno atravesando la carga de arriba hacia abajo (debido a esto son llamados hornos de llama invertida), teniendo en cuenta, además, que se abandona el horno por el conducto de abducción de gases que se encuentra en el centro del suelo, ya que los gases son conducidos hacia la chimenea [1].

En la tabla 1 se presentan las características de un horno colmena de la Ladrillera Versalles de Ramírez Hermanos Ltda.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DEL HORNO COLMENA

Descripción elementos del horno	Características
Capacidad instalada de producción	16600
Año de fabricación	2005
Material de construcción del ducto	ladrillo
Combustible utilizado	carbón mineral
Consumo de combustible	167
Elemento	Dimensión
Altura total del horno	6 metros
Cilindro	Diámetro: 11,5 metros
Cúpula	Diámetro: 10,9 metros
Puertas	1,60 x 2,100 metros (2)
Hornillas	1,35 x 1,30 metros(10)
Bocas de alimentación	Radio interno: 50 cm radio Externo: 65 cm(10)
Foso de extracción de gases	Diámetro: 7,8 metros Profundidad: 1,5 metros
Ducto de salida de gases	Alto: 0,8 metros Ancho: 1,75 metros Largo: 9 metros
Primer tramo de la chimenea	Alto: 6,59 metros Ancho: 1,3 metros Largo: 1,9 metros
Segundo tramo de la chimenea	Alto: 13,41 metros Ancho: 1 metro Largo: 1,4 metros

B) Caracterización de instrumentos de medición de temperatura

Con el fin de realizar el control de temperatura de los hornos tipo colmena, se encuentran instaladas termocuplas tipo k, las cuales están dispuestas en dos lugares estratégicos

introducidas a 50cm dentro de las paredes del horno. La primera se encuentra ubicada a una distancia de 1,2 metros del piso y la otra se encuentra a una altura de 2.7 metros. Estas termocuplas solo dan la información de temperatura de las paredes del horno, por ello, para poder determinar la temperatura que se presenta en el interior en distintos puntos del horno, se implementó la utilización de conos pirométricos que mediante su deformación y según su composición, pueden facilitar el conocimiento de la temperatura que se presenta en el interior del horno tipo colmena.

Termocuplas Tipo K

El termopar se basa en el efecto, descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito cerrado formado por dos metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a distinta temperatura.

Esta circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier (año 1834) que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de los metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión y el efecto Thomson (año 1854), que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas [2].

Termopar tipo K, de Níquel-Cromo (cromel) /Níquel-Aluminio (alumel). Se recomienda en atmósferas oxidantes y a temperaturas de trabajo entre 500 °C y 1.250° C. No debe ser utilizado en atmósferas reductoras ni sulfurosas, a menos que esté protegido con un tubo de protección. Se utiliza para temperaturas entre -40 °C y 1.100 °C. [2]

Conos pirométricos marca Orton

Los conos pirométricos Orton se desarrollaron a finales de 1800 para proporcionar al ceramista una herramienta para medir la cocción de productos cerámicos, han resistido el paso del tiempo y continúan proporcionando verificación del efecto combinado de tiempo y temperatura (calor) en cerámica de productos en todo el mundo. El desarrollo de controladores electrónicos combinados con termopares, sin duda ha demostrado ser muy valioso en el control del ciclo de cocción de los hornos de cerámica, pero los controladores no pueden medir el calor [4].

La premisa inicial del desarrollo del cono, era que una mezcla de materiales cerámicos compuestos en proporciones exactas se comportara de manera similar a la cerámica que se estaba quemando en el horno. Posteriormente, se confirmó la premisa de partida y, a partir de ahí prosperaron las mezclas que se deformarían a una temperatura excepcionalmente predecible y serían altamente

reproducibles. Investigaciones relacionadas, determinaron que la forma del cono que funcionó mejor era una pirámide triangular delgada e identificaron las variables que afectaron la precisión del cono y se desarrollaron procedimientos para permitir que el ceramista compensara las variables de procesamiento [4].

El uso práctico de los conos es para la verificación de la uniformidad térmica y la reproducibilidad del trabajo de calor entregado por un perfil de calentamiento específico. El grado final de doblado del cono depende de la velocidad de calentamiento durante los últimos 100 ° C (180 ° F) del perfil de cocción y la temperatura final. Es importante recordar que el cono se dobla en un rango de temperatura bastante pequeño y, aunque el grado de flexión del cono puede parecer significativo, en realidad solamente puede representar unos pocos grados de temperatura. La mayoría de los productos cerámicos no son más sensibles que el cono a la temperatura, ya que comparten muchos de los mismos ingredientes [4].

El cono consiste básicamente en una masa cerámica de composición y puntos de fusión variables, con forma piramidal triangular, confeccionados en moldes de madera y pre horneados a temperaturas bajas que les confiere manejabilidad. Estos conos “testigos”, se colocan sobre una base de arcilla refractaria y se sitúan en el horno de forma que puedan observarse a través de la mirilla. Por efecto de la temperatura y tiempo el cono se reblandece inclinándose hacia la horizontal [4].

C) Gráficas de variación de temperatura en un horno tipo colmena

En estas graficas se puede observar el comportamiento térmico que se presentó durante las quemas realizadas en el estudio efectuado en el horno tipo colmena. En las gráficas que se relacionan a continuación, se encuentran las curvas de temperatura expuestas por las termocuplas y la comparación obtenida con los conos pirométricos Orton en las quemas realizadas para así poder establecer el comportamiento térmico en cada una de ellas.

En la figura 3 se presentan los valores de temperatura obtenidos por la termocupla superior, instalada a una altura de 2,50 metros. El valor que se observa en naranja de 940°C es el promedio de temperatura obtenido por los conos pirométricos.

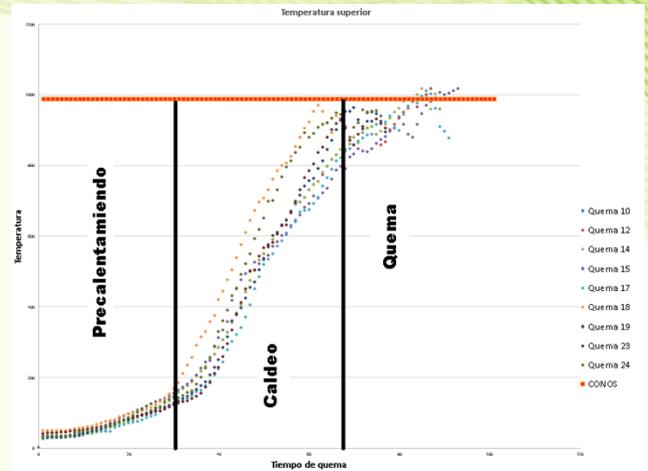


Fig. 3 Gráfica de temperatura superior.

En la figura 4 se presentan los valores de temperatura obtenidos por la termocupla inferior, instalada a una altura de 1,10 metros. El valor que se observa en rojo de 800°C es el promedio de temperatura obtenido por los conos pirométricos a esa altura.

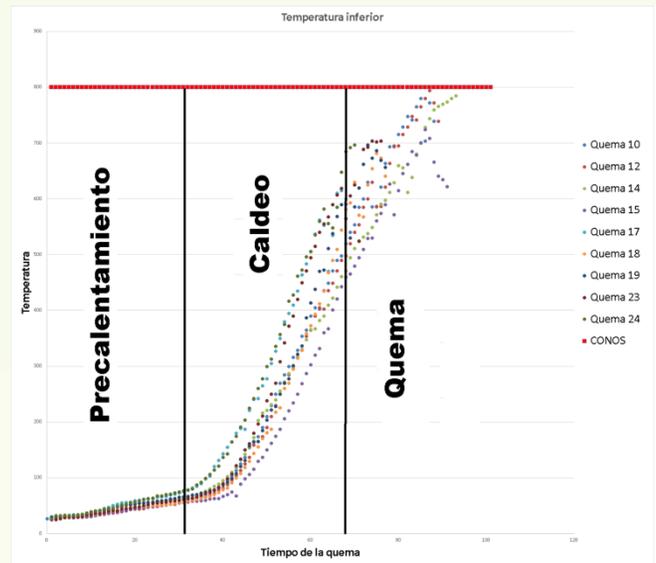


Fig. 4 Gráfica temperatura inferior.

D) Eficiencia energética en el horno

La eficiencia de la energía que se aprovecha en el proceso, permite conocer los valores que intervienen en el proceso de combustión durante el proceso de cocción de los ladrillos para tener los datos exactos de su aprovechamiento energético y las pérdidas generadas por el sistema.

IV. BALANCE DE ENERGÍA EN HORNOS

Para la realización del balance de energía es necesario conocer todas las características del combustible y de la materia prima usada, como son la cantidad de combustible que se emplea por quema, el análisis próximo y último del carbón, el poder calorífico superior e inferior del carbón, las temperaturas del proceso y del ambiente, la cantidad de materia prima a cocer, las propiedades de dicha materia prima, la composición de los gases producto de la combustión, entre otros. Este balance debe realizarse a un volumen de control como el mostrado en la figura 5.

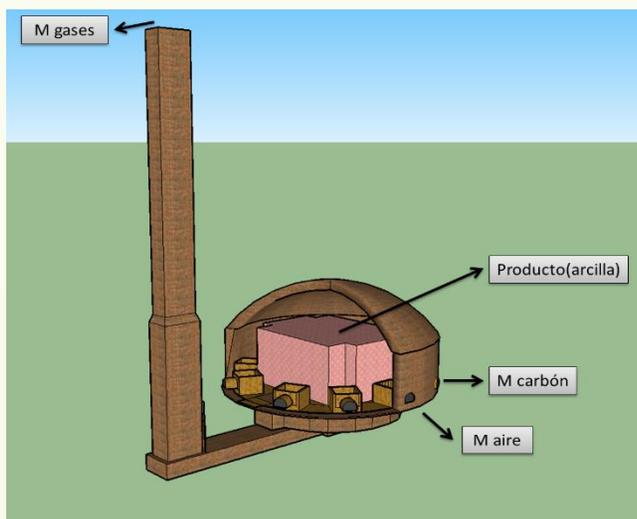


Fig. 5 Volumen de control de un horno tipo colmena.

A) Análisis próximo de carbón.

En la tabla de análisis próximo se presentan los diferentes datos que arroja el estudio Isocinético de un conjunto de quemadas realizadas donde se obtienen un promedio de valores esenciales para el estudio realizado en este proyecto.

TABLA 2. ANÁLISIS PRÓXIMO DE CARBÓN

% humedad carbón	14%
% cenizas	3.95%
% material volátil	15.38%
% carbono fijo	47.89%
poder calorífico (kcal/kg)	7885.2734 kcal/kg
% pérdidas por secado al aire en masa	1,39%

B) Análisis ultimo de carbón

En la siguiente tabla se presentan los datos arrojados del estudio realizado al carbón, dentro del Isocinético, para saber las propiedades que se presentan y su concentración.

TABLA 3. ANÁLISIS ÚLTIMO DE CARBÓN

%c(carbono)	66.41%
%h(hidrogeno)	5,04%
%n(nitrógeno)	1.5%
%o(oxigeno)	10,19%
%s(azufre)	1,4%

C) Balance de masa en el horno tipo colmena

El balance de masa se debe realizar con el fin de identificar las cantidades de materia prima utilizada en una quema que intervienen dentro del proceso, realizado en un horno tipo colmena y se presenta en la tabla 4.

TABLA 4. PESOS TOTALES DE OBRA Y COMBUSTIBLE EN UNA QUEMA DE UN HORNO TIPO COLMENA

Peso total obra cruda (kg)	Peso total obra cocida (kg)	Disminución en peso (kg)
178017,448	158944,15	19073,298
carbón promedio usado en una quema (kg)		= 16.920

V. EFICIENCIA DE UN HORNO TIPO COLMENA

A) Distribución de la energía aportada por el combustible en un horno tipo colmena

En la figura 6 se presenta la distribución de la energía entregada por el carbón dentro del horno tipo colmena de acuerdo a los cálculos realizados en el balance de masa y energía en la etapa crítica del proceso.



Fig. 6 Distribución de energía.

B) Cálculo de la eficiencia del horno tipo colmena

Para el cálculo de la eficiencia del horno por cualquiera de los dos métodos posibles (método directo o método indirecto) se requiere la información energética del horno y

la distribución de la energía suministrada por el carbón en el horno tipo colmena, los cuales se consolidan en la tabla 5.

TABLA 5. ENERGÍA PRESENTE EN EL HORNO COLMENA

Energía	Cantidad (kcal)
Energía suministrada por el carbón (et)	47'550.822,4 kcal
Energía requerida por la arcilla (eu)	12'397.643,7 kcal
Energía total perdida por el horno (p)	35'153.178,7 kcal

C) *Comparativo de eficiencia energética*

Una vez realizado los cálculos pertinentes durante todo el proceso de desarrollo de este proyecto se determina que la eficiencia del horno tipo colmena de la Ladrillera Versalles de Ramírez y Hermanos Ltda., dio como resultado un valor del 26,072% siendo una muy buena eficiencia, teniendo en cuenta la tabla 6 del comparativo de eficiencia energética de diferentes tipos de hornos de acuerdo al programa de Eficiencia energética en Ladrilleras Artesanales – EELA.

TABLA 6. COMPARATIVO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Horno paulistinha	35%
Horno de tiro invertido	31%
Horno tipo colmena	20%
Horno túnel	66%
Horno Hoffman	50%
Horno colmena de la ladrillera Versalles de Ramírez Hermanos Ltda.	26,07%

VI. CONCLUSIONES

Después de realizar la investigación necesaria para obtener la temperatura ideal de cocción de los ladrillos y demás productos derivados de la arcilla que son fabricados por la ladrillera, se concluye que la temperatura máxima ideal es de 970°C y la temperatura mínima es de 850°C, para lograr la calidad deseada en los productos tales como color, textura y resistencia característicos de la Ladrillera Versalles de Ramírez y Hermanos Ltda.

Para un proceso óptimo de cocción de los ladrillos, se identificó que el tiempo ideal de producción debe ser de 90 horas en las cuales intervienen el precalentamiento con 30 o 35 horas, 40 horas para la zona de caldeo y para la quema un total de 20 o 30 horas, ya que una vez acabado este ciclo se debe dejar por 48 horas en enfriamiento.

Para la producción de los ladrillos se tienen tres etapas sumamente importantes que son la clave para lograr el éxito del obtener el producto que logre brindar calidad y satisfacción al cliente, las cuales son: la pre molienda, homogenización y cocción, donde cada una incluye un

proceso ordenado y estricto el cual es necesario para lograr entregar productos de excelente calidad.

En el tiempo durante el cual se realizó el análisis del comportamiento de los diferentes procesos en la Ladrillera Versalles de Ramírez y Hermanos Ltda. y comparándolos con procesos de diferentes ladrilleras no solo en Colombia sino en diferentes países de América Latina, se concluye que la mayoría de los procesos de la industria ladrillera son similares, pero no se puede asumir que son procesos idénticos, ya que existen muchos factores que varían según las condiciones ambientales en cuanto a temperatura ambiente y humedad, las características físicas y químicas del carbón utilizado, la composición de las arcillas y el diseño estructural de los hornos, hace que estos procesos tomen más tiempo, o requieran condiciones diferentes entre industrias para obtener el producto final con las características adecuadas y deseadas.

Para lograr la respuesta al problema planteado en este proyecto se realizó una investigación en cuanto a los perfiles de temperatura que maneja un horno tipo colmena. Se realizaron diferentes pruebas a las arcillas para verificar su comportamiento durante la producción, con el fin de obtener información necesaria para el cálculo de la eficiencia térmica del horno.

REFERENCIAS

- [1] Red de ladrilleras. (2011). Programa de eficiencia energética en ladrilleras artesanales de america latina para mitigar el cambio climatico – Eela. [En línea]. Disponible en: <http://www.redladrilleras.net/>
- [2] Creus, Antonio. *Instrumentación industrial*, octava edición, Mexico, Alfaomega, 2011.
- [3] Gurevich, Yuri; y Ortiz, Antonio: “*Fuerza termo electromotriz en semiconductores bipolares: nuevo punto de vista*”, artículo de en la revista mexicana de física, vol. 49, págs. 115-122, 2003.
- [4] ORTON. (2018). *ORTON*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ortonceramic.com/en/Pyrometric%20Cones/>
- [5] G. Caracas (2015). Caracterización de las pérdidas térmicas a partir de un balance térmico del horno de la ladrillera Meléndez s.a.red.uao.edu.co. [En línea]. Disponible en: <https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/7993/1/t05997.pdf>
- [6] E. G. Fontalvo (2014). Diseño de un horno para cocción de ladrillos refractarios en una empresa del sector ladrillero repositorio. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uac.edu.co/bitstream/handle/11619/816/tmec%201147.pdf?sequence=1&isallowed=y>
- [7] V. A. Garcia (2017). Horno intermitente de tiro invertido tipo colmena con inyección de combustible mecánica (cc). [En línea]. Disponible en: [http://www.caem.org.co/img/hornocolmena\(1\).pdf](http://www.caem.org.co/img/hornocolmena(1).pdf)
- [8] C. A. Gomex. Modelamiento y simulación de un horno túnel industrial. Escuela de procesos y energía. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas. bdigital. 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1882/1/71265369.2010.pdf>
- [9] M. I. Gonzales (2011) Determinar los perfiles de temperatura de un horno para ladrillos del sector chambo dspace. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/1400>