

Panorama sobre modelado de eficiencia energética en hornos ladrilleros colombianos

Overview of energy efficiency modeling in Colombian brick kilns

Cristian David Mojica Cabeza^{*}

¹ Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, Parque Tecnológico UIS Guatiguará, km 2 vía El Refugio, Piedecuesta, Colombia.

^{*} Autor de contacto. Correo electrónico: cmojica@cdtdegas.com

Resumen

Se realizó una revisión de las implicaciones energéticas asociadas a la industria ladrillera colombiana, abordando la temática desde lo general: la industria como un todo, pasando por el análisis del funcionamiento de los distintos tipos de hornos: intermitentes, semicontinuos y continuos. Se evidenció que un análisis energético se puede realizar solo para el caso de los continuos, dentro de los cuales destaca el tipo Hoffman. Se presentan las diferentes convenciones para la estimación de eficiencia energética, y finalmente se describen las metodologías disponibles en cuanto a modelado de eficiencia, dividido en dos grandes fases, obtención de información y desarrollo del modelo. Los modelos más empleados son CFD, perfiles de temperatura, y modelado empírico.

Palabras Clave: *Eficiencia energética; Hornos ladrilleros; Modelado.*

Abstract

A revision of the energy implications associated with the Colombian brick industry, was carried out, addressing the subject from the general: the industry as a whole, going through the analysis of the operation of the different types of kilns: intermittent, semi-continuous and continuous. It is shown that an energy analysis can be carried out only for the case of continuous kilns, among which the Hoffman kiln stands out. The different conventions for the estimation of energy efficiency are presented and finally the methodologies available for efficiency modeling are described, divided into two main phases, information gathering and model development. The most used models are CFD, temperature profiles and empirical modeling.

Key Words: *Energy Efficiency; Brick kilns; Modeling.*

TECNOLOGÍA

1. Introducción

La eficiencia energética se encuentra actualmente entre las principales temáticas que atañen no solo a empresas, sino a países enteros, alineada con los objetivos de desarrollo sostenible, que además de ser justificada desde un punto de vista ambiental, también presenta un fuerte impacto sobre la productividad, la competitividad y el manejo eficiente de recursos. Las mejoras en eficiencia han permitido al 60 % de los países miembros de la Agencia Internacional de Energía disminuir su consumo de electricidad respecto al valor de 2010. En contraparte, casi un tercio del dinero invertido en suministro energético global es empleado en redes y generación de electricidad en economías en desarrollo, esto debido al menor énfasis que tienen las políticas de estas economías en eficiencia energética [1].

En Colombia, la eficiencia energética y otras acciones de mitigación y adaptación al cambio climático, se han empezado a tener en cuenta dentro de la política pública solo en décadas recientes, con iniciativas como la Ley 697 de 2001, que fomenta el uso racional y eficiente de la energía [2]; la Resolución 18-0919 de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) del Ministerio de Minas y Energía, que adopta el plan indicativo nacional para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales (PROURE) [3]; el Documento CONPES 3700, que es una iniciativa de planeación para identificar el potencial de mitigación de la emisión de gases de efecto invernadero, y las medidas y proyectos apropiados para disminuir dichas emisiones sin afectar el crecimiento económico a largo plazo [4]; la Estrategia Colombiana de

Desarrollo Bajo en Carbono, la Política Nacional de Uso Eficiente y Racional de Energía, la Política Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación, la Política de Transformación Productiva Nacional y el Programa de Desarrollo de Proveedores Orientado a Pymes [5]. Estas acciones de política pública y otras relacionadas conducen a que el presente sea un buen momento para implementar proyectos de eficiencia energética, pues existen diversas formas de financiamiento, algunas exenciones tributarias, y políticas para incentivar este tipo de proyectos [6].

Diversas iniciativas de política pública buscan incentivar la ejecución de acciones para mejorar la eficiencia energética en el país, incluyendo al sector de la construcción, teniendo en cuenta que es un sector que sigue en crecimiento. El sector industrial es el segundo sector con mayor consumo de energía final en Colombia, con más del 25 % de la energía total, siendo superado únicamente por el sector transporte [7-8]. El calor directo (hornos) es uno de los usos de energía más importantes en la industria colombiana, representando el 45 % de los combustibles sólidos de la industria, que corresponde a un 22 % de la energía total de la industria [8].

La eficiencia energética en hornos se calcula, esencialmente, con diferenciales de temperatura, por lo que tener acceso a la distribución de temperatura en tiempo real ofrece una herramienta de utilidad para el cálculo correcto de la eficiencia. Estos diferenciales son primordiales para el cálculo de los diferentes flujos de calor asociados al proceso, entre los que destacan la acumulación de calor en la mampostería en el horno, el calor por carga del material a cocer, el calor para sacar la humedad del material, para la descomposición química de arcilla, calor aso-

ciado a la humedad del carbón, por agua formada en la combustión, por humedad del aire y el calor de los humos [9].

2. Industria ladrillera

Al ser una industria que históricamente ha sido bastante artesanal, la implementación y el monitoreo de los sistemas de hornos no está tan desarrollado como en otros sistemas energéticos. En Colombia, la industria del ladrillo de arcilla es heterogénea, con un alto grado de informalidad. De acuerdo con la Corporación Ambiental Empresarial, el 25 % de las toneladas de ladrillos en Colombia es producido por la gran industria en tan solo el 3 % de los hornos, mientras que el 75 % restante se produce en el 97 %, en su mayoría pequeñas empresas y producción artesanal, lo que corrobora la alta informalidad [10]. En Colombia se identificaron 1508 empresas ladrilleras para el año 2015, con un total de 2435 hornos distribuidos en diferentes modelos tecnológicos. La industria ladrillera genera más de 21 000 empleos fijos y cerca de 8 000 empleos temporales, lo que evidencia la importancia de esta actividad económica en el país [11]. En la producción de minerales no metálicos (hornos), los usos de energía más significativos son el calor directo y la fuerza motriz. La energía final del sector en el 2015 fue de 60 214 TJ y con base en la herramienta BEU para la UPME, la energía útil actual para el sector es de 34 291 TJ. Entonces, los potenciales de incremento de la energía útil en este sector varían entre un 31 % y un 51 % (BAT, Best Available Technology) [8].

De acuerdo con el Inventario Nacional del Sector Ladrillero Colombiano, en su reporte del 2015, en Colombia se encuentran instalados 2435 hornos asociados a este sector. Esto representa un gran parque de equipos, sin embargo, la gran mayoría de estos corresponden a hornos de corte artesanal (1055 de pampa y 478 de colmena). Entre los equipos continuos que requieren un monitoreo permanente de las condi-

ciones de operación para mantener los niveles de eficiencia y desempeño, destacan en número los hornos Hoffman, con 97 hornos de este tipo registrados a nivel nacional, de los cuales 11 se encuentran en el departamento de Santander según datos de 2015 [11].

2.1 Hornos ladrilleros

Un horno funciona, de manera simplificada, quemando un combustible y aprovechando el calor generado para cocinar/secar distintos materiales, que en el caso de los hornos ladrilleros, son materiales cerámicos. El proceso de cocción realizado en los hornos se subdivide en tres etapas: precalentamiento, quema y enfriamiento, las cuales deben tener un control de temperatura estricto, para obtener productos con los mínimos defectos y reducir el impacto ambiental, es decir, el máximo rendimiento posible y el mínimo consumo de combustible [9]. Entre las variables de mayor interés se encuentran las asociadas a la combustión, es decir, flujo de aire, flujo de combustible y temperaturas de entrada, debido a que es el principal proceso que ocurre en el horno. Las mayores ineficiencias se presencian cuando ocurre combustión incompleta, ya que los componentes del combustible no se oxidan totalmente, por lo que aparecen los denominados inquemados, los más importantes son el monóxido de carbono e hidrógeno, pero también se encuentran en esa lista el carbono y los restos de combustible [12]. Una forma de monitorear el rendimiento del proceso es el análisis de gases de chimenea, que permite determinar las cantidades de aire y gases requeridas y producidas en un proceso de combustión. Las principales variables de interés en este caso corresponden a la composición de los productos de la combustión [13]. Existen muchos tipos de hornos, que de acuerdo con el tipo de proceso pueden clasificarse en intermitentes, semicontinuos y continuos [14].

2.1.1 Hornos intermitentes

Se constituyen de cámaras individuales o en batería, con los productos, la instalación de cocción y de enfriamiento se mantienen fijos durante la totalidad del ciclo, que consta de cinco pasos, a saber, entrada de los productos, precalentamiento, cocción de los productos, enfriamiento de los productos y finalmente la salida. Los tiempos de las distintas fases difieren según el producto y la naturaleza del proceso. Aunque este tipo de hornos constituye la mayoría en cuanto a uso, no lo es así en la producción, ya que abarca los hornos de corte artesanal. Este tipo de hornos artesanales incluye:

- El horno de fuego dormido, una bóveda circular abierta, conocido también como horno cilíndrico, ver figura 1, se encuentra entre los más básicos y menos eficientes, con un tiempo de cocción de entre 20 y 40 días.
- El horno pampa, rectangulares, descubiertos y con una bóveda inferior para el combustible, ver figura 2, tiempo de cocción de aproximadamente 7 días, alta producción, pero también alta contaminación. Requiere una alta potencia de llama.
- El horno baúl, una modificación del horno pampa para reducir la emisión de humos y material particulado empleando una chimenea. Ver figura 3.

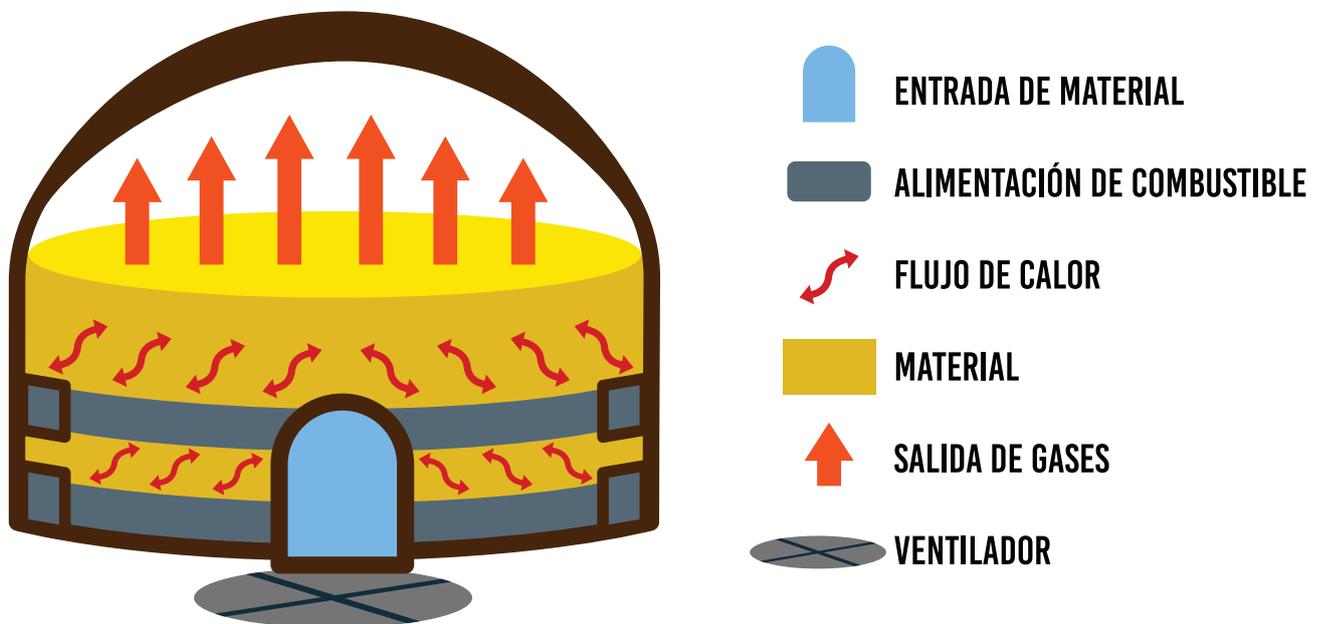


Figura 1. Esquema horno de fuego dormido. Fuente: [15].



Figura 2. Horno pampa. Fuente: [15].

- El horno colmena, también conocido como horno redondo de llama invertida, ver figura 4, es un tipo de horno cerrado, con tiro natural o forzado y alimentación de material seco por una puerta lateral, con posibilidad de automatizar la alimentación del combustible a los hogares laterales. Debido a que no se produce contacto inmediato entre el combustible y sus residuos con el producto, se evita el característico tizne asociado a los demás hornos artesanales. Se les conoce como hornos de lla-

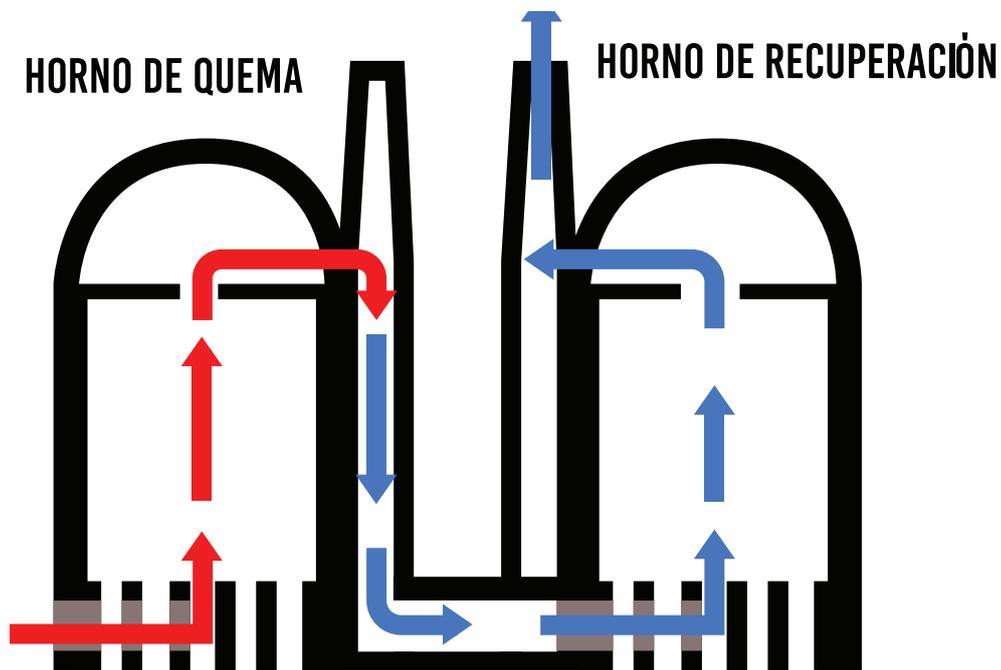


Figura 3. Esquema horno baúl con recuperación. Fuente: [16].

ma invertida debido a que los gases de combustión circulan entre las paredes del horno y del hogar, llegando hasta la parte superior y luego son dirigidos a la parte inferior del horno, atravesando la carga de arriba hacia abajo, para finalmente abandonar el horno por el conducto de abducción de gases localizado en el centro del suelo del horno, que los conduce hacia la chimenea.

Al ser procesos por lotes (*batch*), realizar un monitoreo y/o un cálculo de eficiencia es, además de impráctico, inviable debido al poco control y monitoreo *per se* de este tipo de hornos [17].

2.1.2 Hornos semicontinuos

Los hornos semicontinuos constituyen un punto intermedio entre los hornos continuos y los intermitentes, acercándose más al comportamiento de los primeros en cuanto a carga y recorrido, pero una vez realizada la carga completa del vagón, su funcionamiento se asemeja más al de un horno intermitente, ver figura 5. Respecto al tiempo de trabajo, entre más duren los turnos y el ciclo de cocción más se acerca al comportamiento de un horno continuo, y en caso contrario (poca duración) a un horno intermitente [14].

HORNO LLAMA INVERTIDA

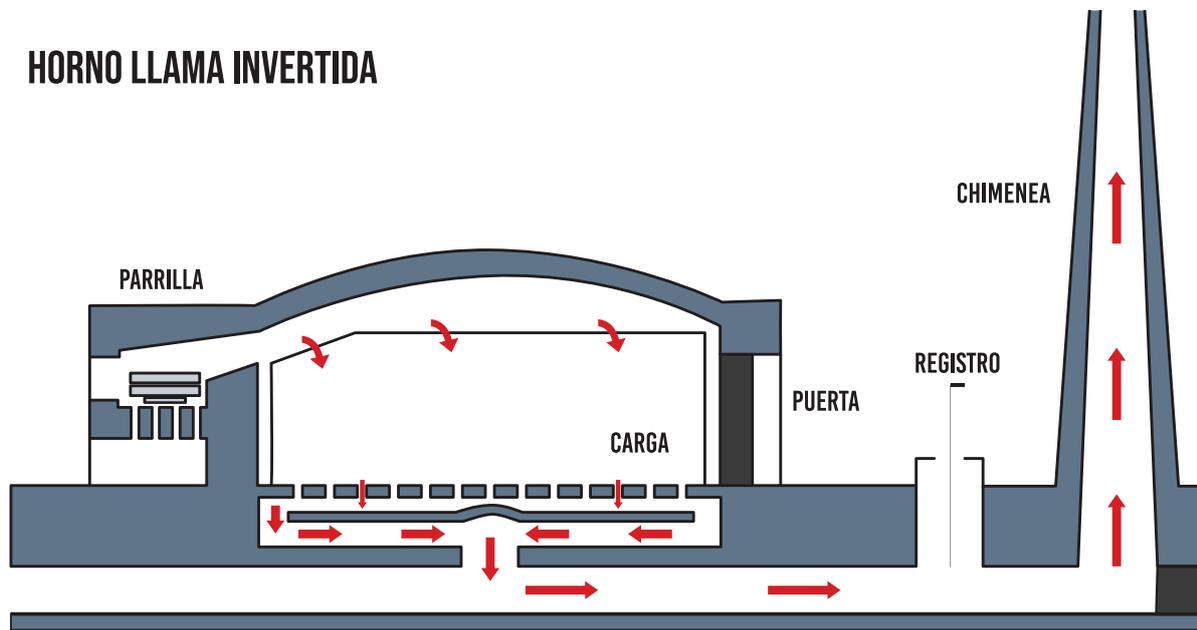


Figura 4. Esquema horno de llama invertida. Fuente: [18].

2.1.3 Hornos continuos

Los hornos continuos se caracterizan, como lo dice su nombre, por el desarrollo ininterrumpido de la cocción y la posibilidad de efectuar las diferentes etapas típicas del proceso sin variar el ritmo de producción. Dentro de esta categoría destacan los hornos tipo túnel y tipo Hoffmann.

este horno se basa en la idea de fijar una zona de fuego y hacer pasar los productos, siguiendo la curva de calentamiento del horno, ver figura 6. Lo cual implica una ventaja de ahorro energético en las fases de enfriamiento y precalentamiento del horno. La longitud de este tipo de hornos es de entre 70 y 150 metros. El combustible se suministra por la parte superior con un sistema de transporte neumático [20].

2.1.3.1 Horno tipo túnel

Son hornos continuos de bajo nivel de contaminación, empleados en industrias altamente tecnificadas y con altos niveles de producción, el material se moviliza mediante vagones que se deslazan a través de la galería. El concepto de

2.1.3.2 Hornos tipo Hoffmann

Los hornos Hoffmann son hornos de alta producción, con dos galerías paralelas formadas por compartimentos contiguos que se unen en sus extremos a través de un pasa fuegos, ver figura 7. Estos hornos presentan una alta eficiencia térmica y de producción, ya que aprovechan el movimiento del fuego para precalentar las cá-

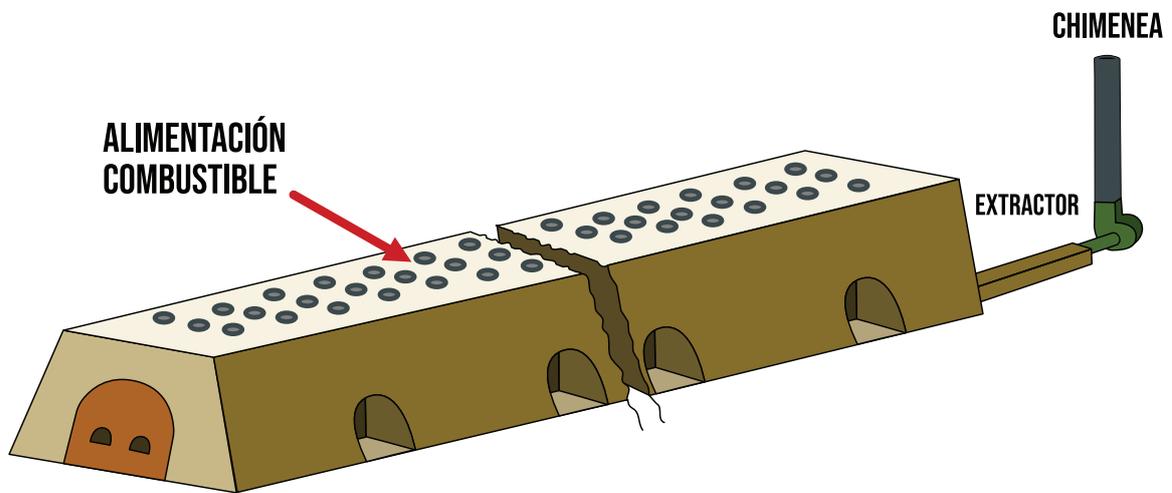


Figura 5. Esquema horno semicontinuo. Fuente: [19].

Nota: El largo del horno dependerá de la producción deseada.

maras precedentes con el calor producido en la cámara de combustión [14]. La alimentación del combustible se realiza en la parte superior del horno, ya sea manual o con ayuda de un quemador para carbón pulverizado. Es necesario que la carga no ocupe más de dos terceras partes de la sección transversal del horno para mantener

la correcta circulación horizontal de los gases a través de las cámaras [9].

Los hornos Hoffmann son los más eficientes en cuanto a costo beneficio, ya que cuentan con una buena capacidad de producción (100 toneladas/día) y su inversión estaría en el orden de

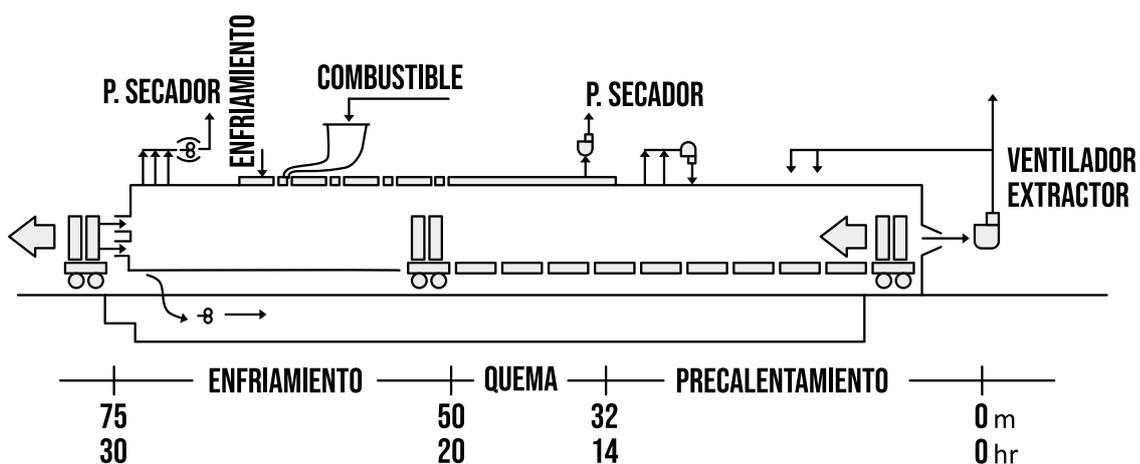


Figura 6. Esquema horno tipo túnel. Fuente: [18].

7 millones COP por tonelada por día, muy por debajo de los 20 en promedio del horno de túnel automático, y su producción está muy por encima de los hornos de corte más artesanal como el de colmena y el de pampa. En este mismo estudio, se determinó que el horno que mejor potencial de retorno presenta, dado por la Tasa Interna de Retorno (TIR), es también el Hoffmann, llegando a un 49,26 %, empleando carbón como combustible [22-23]. Durante el año 2014 y 2015, la Corporación Ambiental Em-

presarial (CAEM) realizó 351 visitas técnicas de recolección y validación de información en los diferentes departamentos del país. En Santander, efectuó 5 visitas, determinando la presencia de 15 hornos, de los cuales 11 son de tipo Hoffmann. En cuanto al consumo de energía de esta industria a nivel nacional (GJ/año), el 77,1 % corresponde a carbón (23 583 439 GJ/año), 20,4 % a biomasa, 2,3 % a cisco de café y 0,2 % aserrín. Los hornos de Santander emplean carbón [11]. Aunque tienen una eficiencia energética supe-

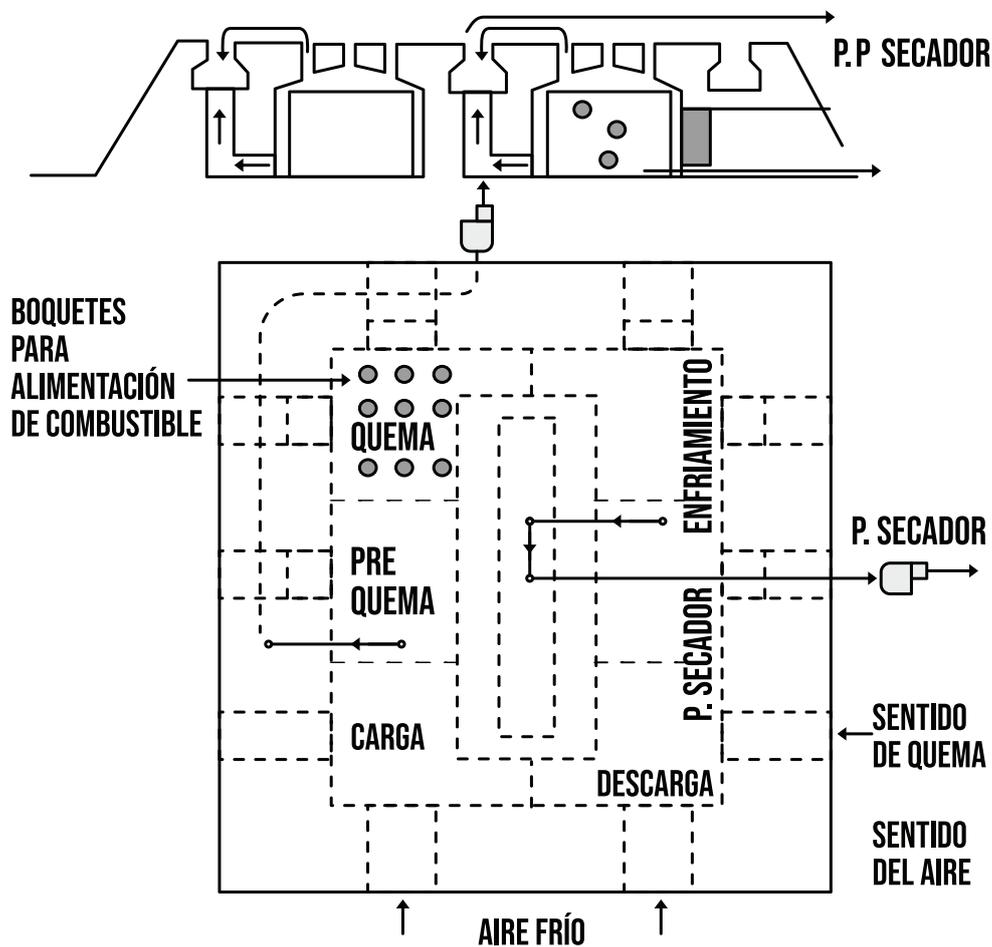


Figura 7. Esquema horno Hoffmann. Fuente: [21].

rior a la de otros hornos convencionales, carecen en general de instrumentación y control, lo cual repercute negativamente en la eficiencia energética absoluta del horno y puede afectar la calidad de los productos [24].

3. Eficiencia energética

Entre las iniciativas para la mejora de la eficiencia energética térmica en el sector industrial se encuentran mejorar el monitoreo del consumo de energía en industrias que actualmente es poco o nada monitorizado, así como la digitalización y automatización de procesos industriales [8]. Otros estudios apuntan al uso de sistemas de regulación automática, de control de temperatura, así como el chequeo periódico de la composición y temperatura de salida de los gases de combustión del horno [25]. Por otra parte, los avances en las tecnologías de comunicación permiten que las mediciones en tiempo real pueden centralizarse y administrarse utilizando redes de sensores e internet, lo que requiere hardware y software apropiados para el almacenamiento, manejo estratégico y obtención de informes de la gran cantidad de datos resultantes [26].

Una forma de evaluar el desempeño del horno en términos de eficiencia energética, es calculando qué tanta de la energía suministrada por el combustible está siendo efectivamente empleada para procesar el material producido en el horno, de esta forma se conoce qué fracción la energía se está aprovechando y el porcentaje de energía que constituyen las pérdidas [12]. En cuanto a las emisiones, los estándares de emisión admisibles para las industrias de fabricación de productos cerámicos a condiciones de referencia y con un exceso de oxígeno de referencia de 18% se establecen en el artículo 30 de la resolución 909, para combustibles sólidos:

250 ppm de material particulado y 550 ppm tanto de SO_2 como de NO_x y la temperatura de los gases emitidos no debe exceder los 180°C [27].

4. Modelado de eficiencia energética

Los hornos continuos son sistemas altamente transitorios, que también pueden presentar heterogeneidades espaciales en una misma cámara o sección. La evaluación de la eficiencia para esta situación va más allá de un cálculo estacionario, ya que debe considerar la sucesión de estados en cada cámara o sección, más el tiempo de quemado de combustible en cada sección y la rotación de material que se va realizando, todo esto afectado también por las condiciones ambientales a través del aire que entra al horno para secar, enfriar y tomar parte de la combustión. Teniendo en cuenta las condiciones de este sistema se puede dividir el modelado en dos etapas principales, la obtención de información y el tratamiento de los datos obtenidos.

4.1. Obtención de información

Para efectos de calcular la eficiencia o desempeño de un horno, lo importante es conseguir que el aporte de calor para las reacciones que se producen en los productos, y la cantidad de calor perdido por los gases en la chimenea y las paredes del horno, sea baja. Con esto se garantiza una mayor eficiencia térmica, lo que implica un menor consumo de combustible. Para ello, se realiza un control de temperatura riguroso con termopares en posiciones representativas que se emplean en posteriores análisis termodinámicos, tanto al interior como al exterior del

horno [9]. Existen otras tecnologías disponibles para la medición de temperatura, entre las cuales destaca el análisis espectral de radiación electromagnética, el cual combina pirometría de dos colores, abarcando múltiples longitudes de onda en el rango de 900 a 1500 °C, con resoluciones del orden del 2 %. Funciona con un cabezal que se introduce en la zona de llama o de descarga de los hornos, generando imágenes térmicas de la llama y del material en cocción, además de capturar y entregar información espectral de la radiación producida por el proceso térmico [28]. Finalmente, dentro de las tecnologías analizadas se encuentra el infrarrojo, cuyo principio de funcionamiento se basa en la radiación que todos los cuerpos emiten dependiendo de su temperatura, ya que durante la dispersión de la radiación se transporta energía que se puede emplear para medir sin contacto la temperatura de un cuerpo; entonces se implementa un circuito electrónico basado en sensores infrarrojos con una salida proporcional a la señal recibida [29]. En cuanto a la medición de contaminantes, en Colombia existe una regulación, según el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial en el protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas. De acuerdo con lo cual, para comparar con los valores de referencia, los datos obtenidos de los diferentes contaminantes tienen que llevarse a condiciones de referencia de 25 °C y presión de 760 mmHg según el artículo 86 de la resolución 909 del 5 de junio de 2008 [30]. Para realizar estas mediciones usualmente se emplean medidores atmosféricos y la toma de datos es puntual, sin embargo, se están explorando diferentes tecnologías, entre las que se encuentran los sensores químicos basados en transductores piezoeléctricos, electroquímicos y ópticos, cuya mayor ventaja es la posibilidad de medir de modo continuo las emisiones atmosféricas asociadas a contaminantes, y que también constituyen un indicador de la presencia de combustión parcial, lo cual está directamente relacionado con la eficiencia energética del sistema [31].

Obtener estos datos en tiempo real y analizarlos corresponde a una aplicación de los conceptos de internet de las cosas (IoT) e industria 4.0 al monitoreo de sistemas térmicos. IoT se refiere al uso de sistemas embebidos, aplicaciones móviles, protocolos de comunicación, almacenamiento y procesamiento de datos, y principalmente el uso de internet para comunicar dispositivos, monitorear y manejar los procesos [32]. La Industria 4.0 no es otra cosa que la aplicación del concepto de IoT y las diferentes tecnologías que implica a escala industrial [26]. Para definir perfiles de temperatura incluso se ha llegado a proponer la implementación de redes de sensores distribuidas como un enfoque alternativo a los termopares ubicados estratégicamente, de manera que la confiabilidad de la toma de datos radica en la cantidad de sensores empleados y no en su confiabilidad individual [33].

Las redes para entornos industriales permanecen en constante mejora, incluyendo nuevos protocolos de comunicación, seguridad y el uso de topologías de red flexibles [34]. Inicialmente, los sistemas de control automático a nivel industrial consistían en un controlador, sensor y actuador, dedicándose únicamente a la tarea de control; posteriormente, aparecieron los sistemas compartidos, que por medio de una red de comunicación permiten realizar tareas de control y medición más elaboradas, constituyendo lo que se conoce como Sistemas de Control Basados en Red [35]. La aparición de las redes industriales hace necesario establecer protocolos de comunicación entre sensores y dispositivos para permitir el intercambio confiable y seguro de información, dando cabida a protocolos tales como Modbus, Interbus, Profibus, Foundation Fieldbus, Profinet, entre otros, abriendo la puerta a retos en el desarrollo de sistemas que integren un amplio rango de dispositivos a la nube [36]. Entre las iniciativas de estandarización de los protocolos de comunicación industriales, una de las más exitosas ha sido el OPC (*OLE for process control*). En este tipo de comunicación, se implementa un cliente y un servidor

OPC que se encarga de las comunicaciones, de manera que la fuente y el receptor de los datos no requieren información sobre el formato de datos que utiliza la otra parte [26]. Uno de los aspectos críticos del IoT y la industria 4.0 es el manejo de datos. Debido a la cantidad de información disponible (esto depende directamente de la periodicidad de las medidas) y requerida para el control y monitoreo de los procesos, se requiere hardware y software adecuados para almacenar, manejar y procesar correctamente los datos [26].

4.2. Desarrollo del modelo

Si bien los datos que se requieren para cada modelo pueden variar, en el caso de los hornos se mantiene como constante la necesidad de toma de temperatura, así como de las propiedades asociadas al flujo de combustible y a los gases generados. De esta manera, una vez se tiene acceso a esta información se pueden emplear distintos modelos para obtener las variables de salida deseadas, dentro de las cuales destaca la eficiencia, tanto de la combustión, como global. Dentro de los modelos más empleados a nivel académico, destaca el modelado CFD (*Computational Fluid Dynamics*) por el nivel de detalle que proporciona; sin embargo, para sistemas de uso industrial se suelen emplear modelos termodinámicos basados en perfiles de temperatura para estimar las pérdidas de calor del sistema; y, finalmente, se encuentran los modelos empíricos, capaces de modelar variables de salida de interés a partir de unas cuantas variables de entrada.

4.2.1. CFD

En cuanto al modelado de los hornos, ya que los perfiles de temperatura y la distribución de flujos de calor tienen tanta importancia, una de las opciones que resalta es el modelado CFD, el cual permite generar una aproximación bastante cercana al comportamiento real, ya sea de subsecciones del horno o de este mismo en su totalidad.

El modelado CFD se basa en una simulación del sistema de manera detallada, teniendo en cuenta las diferentes propiedades de los fluidos, para de esta manera poder determinar su comportamiento y definir perfiles de flujo y temperatura detallados. Sin embargo, aunque es una herramienta bastante útil para el análisis de eficiencias y el modelado en general de sistemas energéticos con flujos complejos, su aplicación en sistemas de uso constante es bastante limitada debido a los requerimientos computacionales que implica [37-38]

4.2.2. Perfiles de temperatura

Disminuyendo la complejidad del modelo, se pueden encontrar los modelos basados en los perfiles de temperatura, es decir en las pérdidas de calor calculadas a partir de estos diferenciales de temperatura, ya que estos balances de calor cuentan con variables que permanecen constantes como lo son las dimensiones del horno, condiciones ambientales y diferentes propiedades de transferencia de los materiales constituyentes del horno en sí, así como de los productos, las variables medibles en tiempo real podrían delimitarse como un par de fluidos y los perfiles de distribución de temperatura, posibilitando la implementación de monitoreo en tiempo real [39].

En la literatura se encuentran casos limitados de implementación de redes de monitoreo en tiempo real para el cálculo de eficiencia, teniendo como común denominador la inclusión de perfiles de temperatura, ya que constituyen una variable crítica en este proceso. En una de las implementaciones se realiza un procesamiento analógico-digital de la información recibida de los termopares instalados, para luego ser almacenada a través del software Labview en el reporte de adquisición y generar los perfiles de temperatura. Estos perfiles de temperatura se generan a partir de los termopares montados en posiciones representativas, de manera que sirven para el posterior cálculo de la eficiencia por medio de un análisis termodinámico [40].

4.2.3. Modelado empírico e inteligencia artificial

Los modelos que son más empleados al momento de realizar monitoreo o cálculos en tiempo real son los empíricos, debido a que en éstos las variables que normalmente no varían en el tiempo, anteriormente mencionadas (como las dimensiones del horno), se estiman por medio de constantes en un modelo que presenta como entradas una cantidad limitada de variables y como salida la o las variables de interés para el proceso, en muchos casos, la eficiencia. Estos modelos usan como entrada para su entrenamiento los datos obtenidos de otros modelos que tienen en cuenta la mayor cantidad de datos para generar aproximaciones bastante buenas a partir de regresiones y, en la actualidad, modelos entrenados con inteligencia artificial [41].

5. Conclusiones

Abordando el tema desde el caso específico de Santander, queda claro que la tecnología de referencia son los hornos tipo Hoffman, que además de ser de tipo continuo (lo que posibilita la implementación del modelado) constituyen más de un 73 % de los hornos presentes en el departamento de acuerdo al censo realizado.

Se encontró que la variable más importante para el análisis de la eficiencia de los hornos es la temperatura, sin embargo, hablar de temperatura implica analizar los perfiles de temperatura que se generan, ya que para este caso el sistema es altamente no estacionario.

Las aplicaciones encontradas en la literatura, además de escasas, se limitan a aplicaciones en las que se define el sistema respecto a perfiles de temperatura, o se estudian casos puntuales con ayuda de CFD, lo que abre las puertas a la posible aplicación de métodos empíricos basados en inteligencia artificial para el estudio de estos sistemas energéticos.

La alta informalidad de la producción cerámica, específicamente de ladrillos, en la industria colombiana imposibilita el correcto seguimiento del crecimiento de esta, así como su impacto medioambiental, esto potenciado por la falta de control en cuanto a eficiencia y emisiones.

Bibliografía

- [1] *International Energy Agency - Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. 2018. World Energy Outlook 2018 - Executive summary.*
- [2] *Congreso Nacional de la República de Colombia. 2001. Ley 697 de 2001 - Mediante la*

cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.

- [3] Unidad de Planeación Minero Energética - Ministerio de Minas y Energía - República de Colombia. 2010. Resolución 18 - 0919 de 2010 - Por la cual se adopta el Plan Único Indicativo 2010-2015 para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, PROURE, se definen sus objetivos, subprogramas y se adoptan otras disposiciones al respecto.
- [4] Departamento Nacional de Planeación - República de Colombia. 2011. Documento Conpes 3700 - Estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia.
- [5] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - República de Colombia. 2013. Evaluación de necesidades tecnológicas y planes de acción tecnológica para mitigación al cambio climático.
- [6] Durán Suárez CA. 2017. Oportunidades de las empresas de servicios energéticos, en el mercado de la eficiencia energética de la industria colombiana. Tesis de Maestría en Gestión de la Industria Minero Energética, Universidad E.A.N., Colombia.
- [7] Unidad de Planeación Minero Energética - Ministerio de Minas y Energía - República de Colombia. 2018. Boletín estadístico de minas y energía 2016-2018.
- [8] Unidad de Planeación Minero Energética, IREES, TEP, Corpoema. 2019. Primer balance de energía útil para Colombia y cuantificación de las pérdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética - Resumen ejecutivo BEU sector industrial.
- [9] Guerrero Gómez, G. 2017. Hornos de combustión: alternativas de reducción de emisiones e incremento de rentabilidad. Tesis de maestría en Sistemas Energéticos Avanzados, Universidad de Santander, Colombia.
- [10] Pimienta Gómez, C. 2019. Ladrilleras de Colombia, unidas en nuevo comité de la ANDI. Publicación de la ANDI, Colombia.
- [11] CAEM. 2015. Inventario nacional del sector ladrillero colombiano.
- [12] Perez, S., Cañizares Torres, H. 2012. Diagnóstico de los Procesos de Combustión Ejecutados en la Industria Cerámica en el Área Metropolitana de San José de Cúcuta, Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia.
- [13] Takeuchi, C. 2007. Comportamiento en la mampostería estructural, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- [14] Proyecto Colombia. 2011. Programa Eficiencia Energética en Ladrilleras Artesanales - EELA. Caracterización de los Hornos usados en la industria ladrillera.
- [15] DETERMINACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN QUE SERVIRAN COMO INSUMO PARA LA HERRAMIENTA LEAP-IBC CAEM 2020
- [16] Luján, M. & Guzmán, D. 2015. Diseño, Construcción y Evaluación de un Horno (MK3) para la Cocción de Ladrillos Artesanales. Acta Nova, 7(2), 165-193. Recuperado en 13 de diciembre de 2021, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892015000200006&lng=es&tln-g=es.
- [17] ANFALIT. Diagnóstico de la Industria Ladrillera Nacional. Camargo y Asociados Ingenieros Consultores. Bogotá. 2002
- [18] ECOCARBON, Ministerio de Minas y Energía. Universidad Pontificia Bolivariana, UPB. 1998. Hornos Ladrilleros a Carbón. ISBN: 958-696-018-8.

- [19] Unidad de Planeación Minero Energética – Asociación Centro Nacional Salud, Ambiente y Trabajo CENSAT “Agua viva”. 1999. Asesoría para la Elaboración de un Plan Estratégico para el Mejoramiento de la Eficiencia Energética y Condiciones Ambientales de la Pequeña Industria Ladrillera del Valle de Sogamoso.
- [20] Rojas Vargas, José Ignacio. Proyecto Puerto Salgar Horno Continuo de Cámaras. CAR – CINSET. Bogotá 2008
- [21] UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA. UPB, ORGANIZACIÓN DE ESTADOS AMERICANOS. OEA y COLCIENCIAS. 1998. Auditorías energéticas: industria ladrillera, Programa de Conservación y Sustitución de Energía, Medellín, s.f.
- [22] Caceres Gomez, H. 2000. Evaluación financiera del potencial de URE en el subsector industrial colombiano de ladrillo, vidrio y cerámica.
- [23] Wakkack, J.S., Ramanathan, V. 2009. The other climate changers. Why carbon negro and ozone also matter. Foreign Affaires. Recuperado de <http://www.eamanathan.ucsd.edu/files/pr168.pdf>
- [24] Suma Quispe, Celso et al. Estudio de Definición de Tipo de Horno Apropiado Para el Sector Ladrillero. CONAM. Cusco. 2008
- [25] Unidad de Planeación Minero Energética – Ministerio de Minas y Energía – República de Colombia. 2001. Determinación de la Eficiencia Energética del Subsector Industrial de Ladrillo, Vidrio y Cerámica.
- [26] Sáez Serrano A. 2017. Aplicación del software Wonderware a simuladores industriales de procesos. Tesis de pregrado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, Universidad de Valladolid, España.
- [27] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2008. Resolución 909. Bogotá, Colombia.
- [28] Calle, Carlos. (2011). Medición de Temperatura en base al Análisis Espectral de Radiación Electromagnética. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Física. Tesis de Maestría.
- [29] Custodio, Ángel, & Balza, Zahyra. (2006). Sistema de medición de temperatura sin contacto con el proceso. Universidad, Ciencia y Tecnología, 10(38), 73-76. Recuperado en 21 de enero de 2022, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212006000200005&lng=es&tln-g=es.
- [30] Guerrero-Gómez, G. ., Espinel-Blanco, E., & Flórez-Solano, E. N. (2017). Medición de emisiones atmosféricas en hornos a cielo abierto en el municipio de Ocaña, Norte de Santander. Revista Ingenio, 14(1), 53–61. <https://doi.org/10.22463/2011642X.2195>
- [31] Escalona, Luís, & Manganiello, Lisbeth, & López-Fonseca, Martha, & Vega, Cristóbal (2012). Los sensores químicos y su utilidad en el control de gases contaminantes. Revista INGENIERÍA UC, 19(1),74-88.[fecha de Consulta 20 de Enero de 2022]. ISSN: 1316-6832. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70732261010>
- [32] Kranz M. 2017. Internet of Things: Construye nuevos modelos de negocio. LID Editorial.
- [33] Iyengar SS, Brooks RR. 2005. Distributed sensor networks.
- [34] International Energy Agency - Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. 2018. World Energy Outlook 2015 - Executive summary.
- [35] Toro A, Sánchez G, Strefezza M, Granado E. 2017. IIoT y sistemas de control: oportunidades, desafíos y arquitecturas. Ciencia e Ingeniería 38(3).
- [36] Irwin JD, Wilamowski BM. 2011. The Industrial Electronics Handbook - Five Volume Set.

CRC Press.

- [37] Tehzeeb, A. 2013. *Evaluation of Brick Kiln Performances using Computational Fluid Dynamics (CFD)*. A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering. RMIT University.
- [38] Mançuhan E, Kuçukada K, Alpman E. 2010. *Mathematical Modeling and simulation of the preheating zone of a tunnel kiln*.
- [39] Durakovic J, Delalic S. 2006. *Temperature field analysis of tunnel kiln for brick production*. *Materials and Geoenvironment*, vol. 53. No. 3, pp. 403-408.
- [40] Marrugo, C. 2015. *Desarrollo de un Instrumento Virtual para la Generación de perfiles de Temperatura en Hornos*, Ocana: Universidad Francisco de Paula Santander Ocana.
- [41] Hajilary N, Rezakazemi M. 2019. *Optimization of Combustion Burner at Hoffman Brick Factories*. *Modares Mechanical Engineering* vol. 19(5), pp 1095-1101.