



Análisis multiobjetivo del proceso de generación de energía en plantas de producción artesanal de ladrillo

Orieta Ortiz Benavides

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente
Manizales, Colombia
2017

Análisis multiobjetivo del proceso de generación de energía en plantas de producción artesanal de ladrillo

Orieta Ortiz Benavides

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Director:
Ph.D. Yasel Costa Salas

Línea de Investigación:
Biosistemas integrados

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente
Manizales, Colombia
2017

Dedicatoria

A Dios, porque me ha dado la fuerza y pasión por la investigación; a mi familia que han sido mi soporte.

Resumen

En el presente trabajo se propone un proceso de optimización de un sistema energético complejo introduciendo factores externos a partir de algoritmos evolutivos multiobjetivos (AEMO), estos se emplean en la resolución de problemas energéticos reales de optimización no lineal. Se incluyen objetivos termoeconómico y ambiental; el sistema energético es formado por un horno para cocción de ladrillos artesanales tipo Pampa.

La metodología expuesta permite evaluar funciones objetivo formadas por costos del combustible e impacto ambiental desde el punto de vista de emisión de cenizas. Las metas en la optimización del sistema global son minimizar los residuos de la combustión y maximizar la eficiencia exergética.

Abstract

In this research is proposed an optimization of a complex energy system introducing external factors, using multiobjective evolutionary algorithms (MOEA) for solving a multiobjective nonlinear optimization problem. Thermoeconomic and environment objectives are included in this methodology. The energy system is formed by an oven for baking handmade brick Pampa type.

The methodology allows to evaluate objective functions conformed by the fuel costs and environmental impact from the emission of ashes perspective. The goals in the optimization of this global system are to minimize combustion residuals and maximize exergetic efficiency.

Contenido

Resumen	4
Abstract	5
Lista de tablas	VII
Lista de figuras	¡Error! Marcador no definido.
Introducción.....	IX
Capítulo I	XI
1.1 Antecedentes	XI
1.2 Problema de investigación	XIII
1.2.1 Contexto del problema	XIII
1.2.2 Pregunta de investigación	XIV
1.3 Referente teórico	XIV
1.3.1 Proceso de fabricación de ladrillos.....	XIV
1.3.2 Análisis de sistemas energéticos	XVIII
1.3.3 Análisis multiobjetivo para la optimización de sistemas energéticos.....	XXI
2. Justificación.....	XXI
3. Objetivos.....	XXII
4. Metodología.....	XXII
4.1 Etapas de desarrollo del proyecto	XXII
Capítulo II.....	XXVIII
5. Resultados y discusión.....	XXVIII
6. Conclusiones.....	XXXVII
7. Recomendaciones.....	XXXVIII
BIBLIOGRAFÍA.....	XXXIX

Lista de figuras

Figura 1. Proceso de producción de la industria cerámica.....	19
Figura 2. Diagrama de flujo de Algoritmo Genético.....	38
Figura 3. Levantamiento horno.....	41
Figura 4. Leña utilizada como combustible en cocción de ladrillos.....	43
Figura 5. Diagrama proceso cocción de ladrillo.....	44
Figura 6. Propuesta de modelo de aprovechamiento energético.....	47
Figura 7. Evaluación de la convergencia de la función objetivo 1.....	49
Figura 8. Evaluación de la convergencia de la función objetivo 2.....	50

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros requeridos por los objetivos del problema.....	36
Tabla 2. Variables del proceso de optimización.....	35
Tabla 3. Restricciones de optimización del algoritmo.....	37
Tabla 4. Características energéticas del algarrobillo.....	42
Tabla 5. Costo exergético del combustible actual.....	43
Tabla 6. Composición del combustible (madera).....	44
Tabla 7. Elementos de entrada al horno.....	44
Tabla 8. Elementos de salida del horno.....	45
Tabla 9. Datos medidos en el horno.....	46
Tabla 10. Poder calorífico de biomasa residual de palma.....	48
Tabla 11. Costo exergético biomasa residual de palma.....	48
Tabla 12. Resultados de optimización.....	51
Tabla 13. Resultado prueba de hipótesis con estadístico t de Student.....	52

Introducción

Esta investigación pretende analizar el proceso de generación de energía en plantas de producción artesanal de ladrillo, mostrando la incidencia de las variables de costos y ambientales en la selección de combustibles utilizados para tal fin.

El aporte de este trabajo consiste en la evaluación del proceso real de generación de energía para la producción de ladrillo, se comparara con un modelo teórico que usa como combustible biomasa residual; este diseño puede constituirse como base para una estrategia de reconversión tecnológica que apunte a la eficiencia exergética que permita ahorros de recursos financieros en la producción de ladrillos en el Cesar.

En la evaluación se procura ir más a fondo de un simple análisis energético donde se establecen los flujos y se identifican las pérdidas al ambiente; este se torna insuficiente cuando se trata de estimar las magnitudes más significativas de las verdaderas ineficiencias termodinámicas presentes en los flujos de energía disponibles para producir trabajo.

En este campo se ha desarrollado una línea teórica de optimización de sistemas energéticos que tiene su origen en la termoeconomía, por medio de la cual se hacen análisis del trabajo útil en cada corriente de estos sistemas considerando aspectos económicos; siendo esto más apropiado para la evaluación de un caso real que los obtenidos únicamente de un análisis energético (Tsatsaronis, 1993). Estos estudios avanzan hasta empezar a considerar las variables del entorno, apoyado en el análisis multiobjetivo lo cual da la posibilidad de evaluar condiciones óptimas de maniobrabilidad en un ambiente externo probable (Bastidas et al, 2010).

Hasta ahora, las herramientas se han aplicado en la optimización de sistemas de conversión de energía basadas en los conceptos de termodinámica y economía, incluyendo aspectos fundamentales para reducir el impacto ambiental (Meyer, et al., 2009). Sin embargo, el análisis puede servir de complemento a la optimización multiobjetivo (MO), ya que permite incluir las variables externas a un sistema de energía complejo (Garduño et al., 2001); por lo que la teoría termoeconómica combinada con los algoritmos evolutivos, representa una herramienta muy poderosa para el estudio sistemático en la optimización de los sistemas energéticos (Sahoo, 2007; Toffolo y Lazzaretto, 2002). Este trabajo recoge algunos de los puntos de vista señalados anteriormente, pero además busca analizar un sistema energético de acuerdo a las características de entornos diferentes, para determinar según el criterio del decisor, un entorno favorable que sopesa la maximización de los ingresos potenciales y la disminución del impacto ambiental por el uso de combustibles de calidad.

Específicamente se compara energéticamente el proceso de cocción de ladrillos artesanales en el Departamento del Cesar y un sistema con las mismas características de mejor tecnología, con posibilidades de uso de biomasa residual como combustible teniendo en cuenta la calidad y costos de los mismos y la necesidad de utilizar mezclas de estos combustibles que satisfagan simultáneamente dos criterios de evaluación, que se dominan termoeconómico y ambiental.

En este documento se aborda el desarrollo de la investigación de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se describen los antecedentes y conceptos teóricos relevantes desarrollados y que sirven como base para análisis puntual del caso de los hornos para producción de ladrillos, se estructuran los antecedentes del proyecto, se formula el problema de investigación y se desarrolla el referente teórico. Además se complementan aspectos relacionados con evaluación de sistemas energéticos, igualmente se expone la justificación del proyecto, se establecen los objetivos general y específicos, las unidades de trabajo y de análisis, el procedimiento investigativo con las técnicas de recolección de información y las correspondientes metodologías.

En el Capítulo 2 se muestran los principales hallazgos y resultados de la investigación, donde se realiza la descripción de los sistemas energéticos encontrados en campo, las condiciones actuales de entrada y salida tanto del combustible como del producto y se aplica el algoritmo para llevar a cabo la optimización el proceso.

Capítulo I

1.1 Antecedentes

En la actualidad, las prácticas relacionadas con la producción de ladrillo artesanal se llevan a cabo mediante una serie de actividades estrictamente ceñidas a variables como el tipo de horno, la disponibilidad de combustible en la región, el clima, la temporada del año, el monto de la producción, las tecnologías disponibles en el país, las normativas existentes, entre otras, dando como resultado incontables algoritmos de manufactura en los más de 45 mil hornos artesanales con los que cuenta sur y centro américa. Por ello hoy por hoy se encuentran en desarrollo variedad de programas que tienen como fin dar uniformidad a dicha “Industria”, buscando un beneficio económico, social y ambiental para toda la región (Areiza Martínez, 2014).

La Unidad de Planeamiento Minero Energético UPME en 2001, emprendió el análisis y la determinación de indicadores energéticos y ambientales del subsector industrial de ladrillo, vidrio y cerámica, las cuales consumen cerca del 6% de la energía total del sector industrial.

Estas industrias utilizan una gran variedad de tecnologías y de tipos de hornos para la producción, de allí que si estas industrias carecen de una tecnología moderna en su operación se tiende a una gran ineficiencia energética, lo que a su vez implica un desperdicio muy perjudicial de energía, que les genera mayores costos y hace a las empresas, en algunas ocasiones, no competitivas.

Una tecnología obsoleta o artesanal en estas industrias produce, además de la baja eficiencia energética, un fuerte impacto sobre el medio ambiente, ya que una mala combustión genera una alta contaminación ambiental.

En análisis de los hornos de cocción de ladrillo, se concluye que los hornos periódicos como lo son los tipo pampa, llama dormida y colmena no son recomendables desde el punto de vista energético, pues su consumo equivale a seis veces el consumo de un horno Túnel, que tiene el menor consumo específico (Upme, 2001).

En Perú se desarrolló el proyecto “Uso de cascarilla de arroz como fuente energética en ladrilleras”, cuyo objetivo principal era sustituir la leña de algarrobo por cascarilla de arroz como combustible entre los pequeños productores de ladrillos de la ex Región Grau, desarrollando técnicas que fomentaban el empleo eficiente de la cascarilla de arroz en el proceso de quema. El piloto desarrollado muestra que el reemplazo de leña por la cascarilla en el proceso de quema de ladrillos es viable técnica, social y económicamente; por tanto su empleo a nivel nacional es una alternativa importante tanto por los efectos globales de preservar sumideros de CO₂, así como de disminuir costos de producción para los ladrilleros artesanales. El uso de la cascarilla de arroz en la mezcla mejora el acabado final y la resistencia de los ladrillos, reduciendo así la polución y los problemas de almacenaje de los residuos (Sánchez et al, 2002).

El instituto Nacional de Ecología de México realizó en 2009 el proyecto “*Evaluación preliminar del impacto ambiental por la producción artesanal de ladrillo: cambio climático, eficiencia energética y calidad del aire*”, cuyo objetivo era generar información sobre el impacto ambiental por la producción artesanal de ladrillo. Lo

anterior se llevó a cabo a partir de la caracterización de la eficiencia energética de dos tipos de hornos ladrilleros, así como la identificación de mejoras tecnológicas que pudieran tener un impacto en la reducción de gases de efecto invernadero. En este se caracterizó el proceso de combustión de los hornos ladrilleros de por lo menos cuatro tipos de hornos representativos de la región del Bajío; determinando los perfiles de temperatura del proceso de cocción de ladrillos y del balance de materiales. Además se realizaron cálculos de reducción de emisiones de GEI con mejoras en eficiencia energética, por mejora tecnológica en el proceso de cocción del ladrillo y por tipo de combustible.

En este proceso se mostró una gran ineficiencia térmica debido a la gran cantidad de pérdida de calor por la configuración y falta de aislamiento de los hornos ladrilleros; además de que existen diversas áreas de oportunidad para lograr una mejora en la eficiencia energética a partir de modificaciones a la configuración de los hornos, así como el proceso de alimentación de los combustibles (Cardenas et al, 2009).

Desde el programa de eficiencia energética en ladrilleras artesanales de América Latina para mitigar el cambio climático – EELA, se realizó el estudio tecnológico para definir el tipo de tecnología de horno apropiada para la reconversión de las ladrilleras artesanales, ingeniería básica y supervisión del montaje. Este tenía como uno de sus objetivos el uso de combustibles menos contaminantes que contribuyan a la reducción de los gases efecto invernadero (Caem, 2011).

Es apremiante la necesidad de tener alternativas para mejorar la eficiencia en la cocción de los hornos de producción de ladrillos, ya que esta industria consume grandes cantidades de energía debido a los largos tiempos de operación y altas temperaturas, siendo de este modo significativo los costos de combustible.

La aplicación de tecnologías que involucren ahorros de energía, es una de las razones que dan relevancia a dicho problema, dado que generan un impacto positivo en la crisis energética del mundo actual, la degradación del medio ambiente, así como en la reducción de los costos del producto (Gómez, 2010).

En este campo se han desarrollado una línea teórica de optimización de sistemas energéticos que tiene su origen en la termoeconomía; por medio de esta se hacen análisis del trabajo útil en cada corriente de estos sistemas considerando aspectos económicos, siendo esto más apropiado para la evaluación de un caso real que los obtenidos únicamente de un análisis energético (Tsatsaronis, 1993). Estos estudios avanzan hasta empezar a considerar las variables del entorno, apoyado en el análisis multiobjetivo (MO) lo cual da la posibilidad de evaluar (múltiples objetivos simultáneamente) condiciones óptimas de maniobrabilidad en un ambiente externo probable (Bastidas et al, 2010).

Hasta ahora, se han realizado procesos de optimización de sistemas de conversión de energía, basados en los conceptos de termodinámica y economía incluyendo aspectos fundamentales para reducir el impacto ambiental (Meyer, et al., 2009); sin embargo el análisis puede servir de complemento a la optimización multiobjetivo, ya que permite incluir las variables externas a un sistema de energía complejo (Garduño et al., 2001), por lo que la teoría termoeconómica combinada con los algoritmos evolutivos representa una herramienta muy poderosa para el estudio sistemático en la optimización de los sistemas energéticos (Sahoo, 2007; Toffolo y Lazzaretto, 2002).

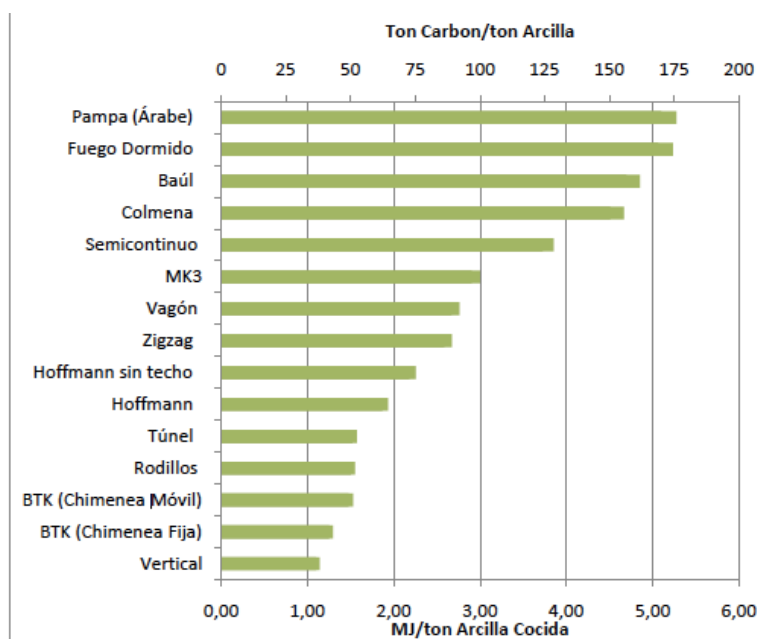
1.2 Problema de investigación

1.2.1 Contexto del problema

Entre las variadas actividades artesanales sobre las que comunidades rurales del Caribe, derivan el sustento de sus familias, se encuentra con mayor fortaleza la alfarería. Cada miembro de la familia de esta comunidad interviene de alguna manera en la producción alfarera, para satisfacer las necesidades básicas como alimentación y vestido; sin embargo, no hay aprovisionamiento de agua potable, ni sistema de alcantarillado, propiciando un problema latente de salud (DANE, 2005).

Para la actividad alfarera, se emplean hornos artesanales fabricados de la misma arcilla, sin las debidas adecuaciones técnicas que permitan aprovechar la mayor cantidad de energía disponible. Estos hornos pueden tener una altura de hasta tres metros, no tienen una chimenea propiamente dicha y el tiempo de residencia de los gases es mínimo, sin posibilidades de utilizar su energía residual, tanto para precalentamiento de aire de combustión o en el secado de los ladrillos. El proceso de secado es totalmente natural y está supeditado a las condiciones climáticas, es decir, sólo es medianamente efectivo en días soleados.

En la Gráfica 1 se observa que la eficiencia energética de los hornos tradicionales de tipo artesanal intermitentes es bastante menor que la de las alternativas continuas y semicontinuas, en general los hornos continuos consumen aproximadamente entre una tercera y quinta parte de lo que consumen los intermitentes. Cabe resaltar que el más eficiente (horno vertical) consume casi 7 veces menos que el más ineficiente (horno fuego dormido), y que este último horno es el que predomina en la zona (Cámara de Comercio, 2011).



Grafica 1. Tipo de horno Vs Consumo energético [MJ/ton arcilla procesada]

Fuente: EELA

La leña es el combustible que se utiliza para la cocción de los ladrillos, en consecuencia el entorno vegetal perteneciente a los ecosistemas de la Sierra Nevada de Santa Marta (Sistema montañoso declarado por la Unesco como Reserva de Biosfera y Patrimonio de la Humanidad en 1979) y de la Serranía del Perijá en la cordillera de los Andes está siendo afectado considerablemente.

Se requiere desarrollar un proceso de optimización que permita evaluar la influencia de características externas como el combustible y las emisiones de cenizas en el proceso de generación de energía en el proceso de cocción de ladrillos artesanales.

1.2.2 Pregunta de investigación

¿Cómo optimizar el proceso de generación de energía para producción de ladrillo artesanal, teniendo en cuenta características externas del combustible y de las emisiones (cenizas)?

1.2.2.1 Principales problemas encontrados

Teniendo en cuenta la contextualización del problema y los antecedentes investigativos, se evidencian pérdidas energéticas debido a la ineficiencia en el proceso de generación de energía en la industria ladrillera del Cesar y baja tecnificación en los hornos de cocción; esto tiene como consecuencia el uso desmedido de madera de los bosques aledaños como combustible.

1.2.2.2 Descripción de la población afectada por la problemática

La principal población afectada son los productores de ladrillos en el Departamento del Cesar, que deben asumir los costos de generación de energía del combustible con un sistema altamente ineficiente.

Por otro lado, el medio ambiente se ve deteriorado por la evidente tala indiscriminada de árboles, que causa deforestación de los bosques nativos de la región. Esto incide directa e indirectamente en el detrimento del paisaje y en la salud de los habitantes de la región.

1.3 Referente teórico

1.3.1 Proceso de fabricación de ladrillos

Las etapas del proceso de fabricación de cerámicos, de diverso tipo, a partir de arcilla, se describen a continuación de forma muy general y puede verse en la Figura 1.

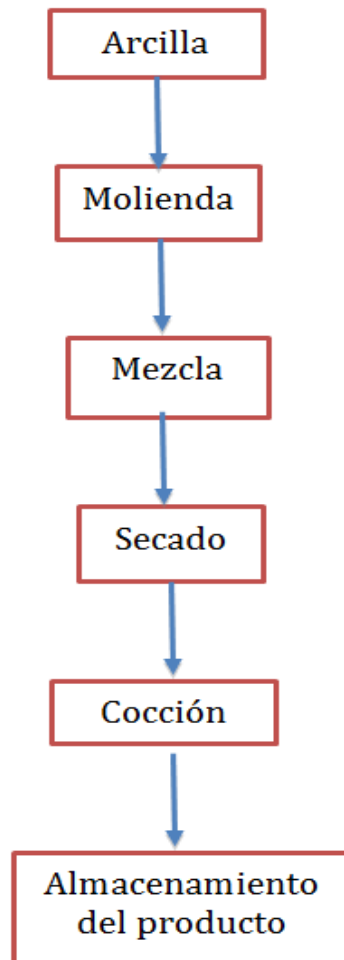


Figura 1. Proceso de producción de la industria cerámica

Fuente: Prevención de la Contaminación en el Sector Cerámico Estructura

1.3.1.1 Recepción y almacenamiento de materias primas

La mayoría de empresas dedicadas al sector cerámico obtienen la materia prima de canteras cercanas al emplazamiento donde se encuentran ubicadas (ya sean propias o ajenas). Esta arcilla sin tratar es transportada mediante camiones hasta el emplazamiento donde se descarga y se almacena hasta su posterior uso. El transporte de las arcillas en el interior de la planta se realiza mediante cintas transportadoras que pueden ser de tres tipos, de acero, de goma o de escamas. Cabe destacar que durante el transporte de las arcillas dentro de la instalación puede existir la emisión de partículas al aire y desprendimientos de materia prima que podrán convertirse posteriormente en residuos.

1.3.1.2 Molienda

En el proceso de molienda se realiza la trituración de la arcilla sin tratar que provenga directamente de la cantera, y se obtiene la materia prima con la granulometría y textura necesarias para su posterior conformado. Puede llevarse a cabo de dos formas distintas, por vía seca o por vía semi-húmeda. Las arcillas secas y duras se preparan mejor en instalaciones por vía seca. Este tipo de sistema asegura la obtención de un porcentaje importante de partículas finas que se humectan con más facilidad y rapidez, obteniéndose

una masa muy homogénea y de mayor plasticidad. Como consecuencia se obtiene un mejor acabado y una mayor resistencia mecánica, tanto del material seco como del producto cocido. Por otro lado, también puede llevarse a cabo este proceso por vía semi-húmeda, donde el proceso de humectación de la arcilla puede comenzar desde el mismo lecho de homogeneización. En estas condiciones el agua queda fuertemente ligada al cristal arcilloso, dando como resultado un aumento de la plasticidad y cohesión de la masa arcillosa, así como un aumento de su resistencia a las tensiones del secado. En algunos casos, la arcilla molida puede ser mezclada con distintos aditivos según los requerimientos de calidad del producto final. Existen distintos tipos de maquinaria para llevar a cabo este proceso según el tipo de molienda que se realice.

Para la rotura de la arcilla en vía semi-húmeda se utiliza el molino de martillo o muelas. Si la trituración se realiza en la mina o cantera, se utiliza la desmenuzadora, que admite desde mineral seco hasta una humedad máxima del 20%. Para el proceso de mezcla es además usual la utilización del rallador alimentador rotativo, que permite obtener una perfecta mezcla entre los aditivos y la arcilla.

1.3.1.3 Conformado

Amasado

La arcilla debe estar lo bastante húmeda (en general entre valores de 12 a 15% de humedad) para que se pueda mantener unida cuando se trabaja. En el amasado se regula el contenido de agua de la mezcla de la arcilla mediante la adición de agua o vapor (el vapor puede provenir de una caldera auxiliar). Para el amasado de la arcilla, en las fábricas de cerámica se utiliza la amasadora, máquina especialmente diseñada para la homogeneización de una mezcla de arcilla y la incorporación de más agua o de colorantes y aditivos. En este proceso se produce un consumo de energía eléctrica debido al propio funcionamiento de la maquinaria, por otro lado la humedad que se debe conseguir en la arcilla se puede proporcionar por dos caminos, adición directa de agua en la pasta, o mediante el vapor producido por una caldera auxiliar.

Moldeo

Aunque la importancia energética del moldeo en el proceso de fabricación de piezas cerámicas es muy pequeña, su influencia sobre el consumo energético es considerable, ya que determina la cantidad de agua en las piezas moldeadas y por tanto el consumo energético del secado. En el caso del moldeo el proceso puede diferir en función del material a fabricar. Los sistemas de moldeo más empleados en la industria cerámica son:

- Moldeo manual: Cerámica artística, ladrillera.
- Tornos cerámicos: Cerámica artística, vajillas.
- Colada: Loza sanitaria.
- Extrusión: Ladrillera.
- Prensado en semi-seco: Baldosas y azulejos.
- Prensado en seco: Azulejos, baldosas, refractarios, vajillas y piezas especiales.

Los sistemas que producen piezas con menor cantidad de agua son el prensado en seco (4% de humedad) y el prensado en semi-seco (10-15% de humedad). El sistema de colada es el que produce piezas con mayor contenido en agua.

1.3.1.4 Secado

El objetivo del secado es la reducción del contenido de humedad de las piezas antes de su cocción, es una operación compleja en la que convergen múltiples factores: naturaleza de la arcilla, grado de preparación y homogeneización, etc. El tipo de secado que se lleve a cabo influirá en la resistencia y calidad final de la pieza después de su cocción.

El problema fundamental del secado es evitar que la contracción que sufre la pieza origine agrietamientos y roturas. Este condicionante controla la velocidad de secado ya que un secado excesivamente rápido puede agrietar la pieza. Para eliminar estos defectos en las piezas hay que evitar que los gradientes de humedad en la pieza sean excesivamente elevados.

1.3.1.5 Cocción

La cocción es la fase más importante y delicada del proceso de fabricación de productos cerámicos. En este proceso se confiere a la pieza las propiedades deseadas, al mismo tiempo que se muestra si las fases precedentes (amasado, moldeo y secado) se han llevado a cabo correctamente o no. Las piezas se cuecen en hornos, a una temperatura que va desde 875° C hasta algo más de 1000°C. Los tipos de hornos más utilizados en el proceso de cocción son los siguientes:

Horno Pampa

Los hornos Pampa se constituyen en cuartos rectangulares descubiertos en la parte superior con puertas de salida y entrada a través de las cuales se extraen e introducen los materiales antes y después de la cocción; además poseen unas bóvedas en la parte inferior formadas por material a quemar, por los cuales se introduce el combustible para la cocción.

Son hornos de rápida cocción (aproximadamente 7 días), alta producción y alta contaminación. El endague¹ del horno debe comenzarse con unos ladrillos de canto, ya cocidos de modo que cubra un cuadrado de 10 a 15 metros de largo. La principal desventaja de este horno es que necesita que el combustible genere mucha llama para que ardiendo con la máxima rapidez, pueda llegar a penetrar hacia arriba y cocer los ladrillos de la parte superior.

Horno Túnel

El principio del horno de túnel es que está formado por una zona de fuego fija, mientras la mercancía a cocer se desplaza. Dentro del horno se distinguen tres zonas: precalentamiento, cocción y enfriamiento.

¹ Endague: consiste en el acomodamiento de la masa dentro del horno.

Precalentamiento: en esta zona existe una corriente de aire caliente procedente de la zona de cocción que circula en sentido contrario al material. Normalmente se utiliza como fuente térmica el calor recuperado del horno y se pretende que el material pierda su contenido en agua (tanto la absorbida superficialmente como la estructural) aumentando la temperatura de manera progresiva.

Cocción: los quemadores de combustible se ocupan de conseguir la curva de cocción óptima en la parte central del horno.

Enfriamiento: el material se somete a enfriamiento progresivo, con el objetivo de evitar grietas en las piezas por un contraste brusco de la temperatura (Campos, 2008).

Horno Hoffman

A diferencia del horno túnel, en este caso el material a cocer se mantiene estático y es el fuego el que se desplaza a lo largo de las distintas cámaras hasta conseguir una curva de cocción de características similares a las generadas en los hornos túnel.

Este tipo de horno está formado por una serie de cámaras unidas, que son llenadas por el material seco proveniente del secadero, donde los quemadores se desplazan de una cámara a otra, cociendo el material. Este sistema también permite el precalentamiento de la mercancía y la refrigeración de los gases de escape. La eficiencia energética de los dos tipos de hornos es diferente, el horno túnel tiene consumo específico medio de 410Kcal/kg frente a las 480 Kcal/kg del Hoffman. Los quemadores del horno, que pueden consumir diversos combustibles (gas natural, coque de petróleo, orujillo), son de varios tipos:

- De impulsos (verticales)
- Laterales de precalentamiento
- De gasificación (EELA, 2011)

1.3.1.6 Preparación y almacenamiento del producto

Las piezas, ya terminadas, se depositan apiladas encima de pellets de madera o de las propias piezas y pueden envolverse con plástico retráctil y fleje para facilitar su posterior distribución. Por otro lado, en algunas empresas se humecta el material terminado para aportar la consistencia requerida por el cliente, este proceso se lleva a cabo de dos maneras distintas en función de cada instalación:

- A través del regado del material con manguera.
- Insertando el producto en piscinas ya preparadas para tal hecho.

El almacenamiento puede ser en nave cerrada o a la intemperie. Este proceso puede realizarse de manera manual o mediante la empaquetadora, para la colocación de flejes o retráctilado de plástico de los paquetes de material terminado (Campos, 2008).

1.3.2 Análisis de sistemas energéticos

Un sistema energético evaluado desde el punto de vista de la termodinámica permite establecer la cantidad ideal en la distribución de los flujos totales de energía, permitiendo así identificar pérdidas de energía. Este análisis no es suficiente para estimar las

magnitudes más significativas de las verdaderas ineficiencias termodinámicas presentes en los flujos de energía disponibles para producir trabajo, las cuales pueden ser estudiadas teniendo en cuenta las irreversibilidades del sistema.

La exergía de un universo dado (sistema con sus alrededores), en un estado definido, como el trabajo útil mínimo necesario para conseguir ese estado a partir de uno de referencia. La exergía es el máximo trabajo útil que podemos obtener de un flujo de energía dado, en cualquiera de sus formas que sea almacenado o transferido; pero también se puede ver como la mínima energía necesaria que se requiera para obtener un producto final (Lezcano, 2011).

La exergía es un parámetro que mide la calidad de la energía, este puede emplearse para analizar la eficiencia energética de los procesos industriales. Con un análisis de exergía pueden compararse diferentes alternativas para comprobar cuál tiene el mayor rendimiento energético, sin embargo, no proporciona soluciones por sí misma.

El análisis exergético se realiza como se describe a continuación:

- Exergía de un flujo de materia: un proceso de flujo de materia en forma de corriente de un fluido cualquiera en régimen estacionario. Se trata de investigar el trabajo útil máximo que puede obtenerse al llevar dicha corriente desde un estado inicial genérico en el que se encuentra, hasta el estado muerto, con la sola intervención de la corriente y la del ambiente.
- Exergía de un flujo de calor: Partiendo de un proceso de flujo de calor. Si un depósito a la temperatura T cede un calor q , se trata de investigar el trabajo útil máximo que puede obtenerse con la sola intervención del depósito y del ambiente, de este a T_0 . De acuerdo con el Segundo Principio el rendimiento máximo de dicha conversión energética es $1 - T_0/T$.
- Exergía química: Un proceso en el cual tiene lugar una reacción química, es decir, un proceso en el cual un flujo de reactivos R en unas condiciones de temperatura y presión T_0 y P_0 , sufre una reacción química para transformarse en un flujo de producto P a las mismas T_0 y P_0 .

El cambio de exergía de un sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la transferencia neta de exergía a través de la frontera del sistema y la exergía destruida dentro de las fronteras del sistema como resultado de las irreversibilidades

$$\chi_{entra} - \chi_{sale} - \chi_{destruida} = \Delta\chi \quad (1)$$

Donde $\chi_{entra} - \chi_{sale}$ denotan la transferencia de exergía en forma de calor, trabajo y masa y

$$\chi_{destruida} = T_0 S \quad (2)$$

Para un proceso reversible, la generación de entropía y por tanto la destrucción de exergía son cero, luego la relación del balance de exergía es este caso es análoga a la relación de balance de energía. La cantidad de energía siempre se conserva para un proceso real, pero disminuye su calidad.

La importancia de la exergía para valorar el desperdicio de recursos exergéticos proviene de los siguientes hechos (Bastidas, 2010):

- a) Toda la sociedad requiere de la realización de tareas mecánicas y termodinámicas para su sobrevivencia.

- b) Cumplir una tarea termodinámica implica la creación de exergía.
- c) La creación de exergía se realiza destruyendo la exergía existente en otras partes.
- d) De las posibles maneras de cumplir una tarea mecánica o termodinámica, habrá una que implique gasto mínimo de exergía; este gasto mínimo de exergía corresponde precisamente a la cantidad de exergía creada por la realización de la tarea.
- e) La diferencia entre la energía mínima requerida y la consumida da una medida cuantitativa del desperdicio del recurso del cual se obtuvo esta última.

Otra alternativa para medir la utilización adecuada de los recursos exergéticos es mediante la llamada eficiencia exergética, la que se define como el cociente de la exergía mínima y la exergía consumida en la tarea; el valor máximo de eficiencia exergética es uno.

La exergía es un concepto de mucha utilidad para el análisis termodinámico de sistemas energéticos en cuanto a las relaciones de flujo de calor y trabajo, la finalidad de uso y la eficiencia exergética del sistema y la relación económica de las corrientes de exergía y los equipos utilizados (Valero et al, 2000).

El segundo principio de la termodinámica establece que la exergía saliente en un sistema que realice un proceso siempre será menor que la entrante, hay una cantidad de esa exergía que necesariamente no se utiliza en el proceso:

$$(Exergía\ entrante) - (Exergía\ saliente) = Irreversibilidad > 0 \quad (3)$$

La irreversibilidad generada por el proceso está relacionada con el concepto de entropía generada:

$$I = T_0 Sg \quad (4)$$

Siento T_0 la temperatura del ambiente de referencia.

No existe la máquina perfecta, y el concepto de eficiencia es el que mide su grado de perfección. Este concepto es más antiguo que la Termodinámica y se define como:

$$\varepsilon = \frac{Unidades\ de\ producto\ obtenido}{Recursos\ utilizados\ para\ obtenerlo} \quad (5)$$

Eficiencia y costo exergético

Aunque un balance de exergía aplicado a un sistema energético permite localizar las pérdidas que se dan en el proceso de transformación, es necesario un profundo análisis adicional en este que permita cuantificar y detectar el origen de estas pérdidas; para esto lo primero es estudiar en que puntos del proceso aparecen las irreversibilidades y relacionarlas con el efecto que tienen en el consumo del recurso.

Se determina entonces además de la exergía para generar un producto, las irreversibilidades acumuladas a lo largo del proceso de obtención del mismo:

$$E^* = E + \Sigma Irreversibilidades\ del\ proceso \quad (6)$$

Donde E^* es el costo exergético de un producto funcional y equivale a la cantidad de exergía necesaria para obtenerlo; este análisis que lleva a determinar los costos de las irreversibilidades constituyen un paso adicional al simple balance exergético y es la base del análisis termoeconómico.

Al analizar un proceso simple, midiendo recursos y el producto en términos de exergía, la eficiencia exergética ε , es la inversa del consumo exergético de recursos k^* y esto es justamente su costo exergético,

$$1/\varepsilon = \frac{F(\text{unidades de energía})}{P(\text{unidades de energía})} = k^* \quad (7)$$

donde P corresponde a las unidades de producto obtenido y F los recursos utilizados para obtenerlos.

1.3.3 Análisis multiobjetivo para la optimización de sistemas energéticos

El estudio de los sistemas energéticos ha tenido el reto de alcanzar mejores niveles de eficiencias y para ello se ha provisto de variadas metodologías, entre las cuales están las no convencionales que incluyen los criterios de la primera y segunda ley de la termodinámica; además de otros aspectos como la relación entre la termodinámica y la economía, resaltando el hecho de que la transformación de la energía lleva implícita la formación de valor agregado al producto, en procura de compensar los efectos de las irreversibilidades en el sistema (Sahoo, 2007; Paulus y Tsatsaronis, 2006; Tsatsaronis, 2007).

Dentro de estas metodologías se enmarca la ecuación termoeconómica, la cual tiene la ventaja de integrar los modelos físicos y económicos del sistema energético, tiene como propósito esencial estudiar la relación entre la termodinámica y la economía; además de obtener modelos que permitan recoger criterios generales para evaluar la eficiencia y el costo de sus productos, en sistemas con un consumo intensivo de energía (Lozano y Valero, 1993).

Para el análisis de sistemas de generación de energía, donde se deben considerar el efecto producido por diferentes factores de manera simultánea, es conveniente aplicar el análisis multiobjetivo; el cual incluye una función objetivo obtenida del análisis termoeconómico. Se consideran además otras funciones objetivo para luego generar un problema de múltiples funciones objetivo.

El análisis multiobjetivo es requerido para describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar alternativas, con base a una evaluación de acuerdo a varios criterios; estos criterios son los puntos de vista considerados relevantes para el análisis y/o la resolución de un problema. En este se modelan procesos de decisión en los que entran en conflicto una decisión a ser tomada o los eventos desconocidos que pueden afectar el resultado.

En este tipo de análisis no se evalúa una única alternativa de solución, ya que aquí se analiza de manera simultánea un conjunto de objetivos a maximizar o minimizar, los que a su vez genera una serie de posibles alternativas de escogencia entre un conjunto de soluciones óptimas excluyentes entre sí.

2. Justificación

La importancia de este trabajo radica en que se evalúa el proceso real de generación de energía para la producción de ladrillo, se comparara con un modelo teórico que use como

combustible biomasa residual y pueda ser tomado como base para una estrategia de reconversión tecnológica que apunte a la eficiencia exergética en la producción de ladrillos en el Cesar.

Este trabajo hace aportes significativos al análisis de un sistema energético, ya que tiene en cuenta variables como los ingresos potenciales y los impactos ambientales que permiten que el decisor pueda evaluar de manera global qué tipo de combustible puede utilizar en la operación del horno.

Respecto a las líneas de investigación en biosistemas integrados, este proyecto dará una perspectiva de evaluación de eficiencia exergética con fines de optimización del proceso de producción de ladrillo, haciendo de este modo una producción más limpia y eficiente, que se enmarca en el desarrollo sostenible.

3. Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un análisis multiobjetivo del proceso de generación de energía para producción de ladrillo artesanal, teniendo en cuenta características externas del combustible y de las emisiones (cenizas).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las condiciones energéticas y exergéticas del proceso de producción de ladrillo artesanal en las condiciones actuales.
- Determinar la eficiencia potencial de ingresos obtenida del análisis de un modelo teórico eficiente comparando con el modelo actual de generación de energía en una planta de producción de ladrillo.
- Evaluar la generación de cenizas del modelo teórico, donde se cambia el combustible tradicional que es leña por biomasa residual de palma de aceite.

4. Metodología

4.1 Etapas de desarrollo del proyecto

El proyecto se desarrolló en cinco etapas que se detallan a continuación:

Etapa I

En esta fase se construyeron diagramas de los procesos donde se muestran los flujos másicos y energéticos de entradas y salidas en cada horno alfarero en los corregimientos de El Cielo, Las Casitas y Valencia de Jesús (Valledupar, Cesar), los cuales concentran el 70% de la producción de ladrillo artesanal del Departamento del Cesar.

Una medición de los flujos permitió determinar la calidad energética y la cantidad másica de las corrientes de entrada y salida de los procesos.

Se realizaron balances de masa, energía y exergía teniendo en cuenta el proceso de cocción que se da en la producción de ladrillos

Para las determinaciones de los flujos másicos y energéticos de los procesos anteriores se realizaron visitas de campo, para observar los tipos y cantidad de combustible por quema, tipo de horno utilizado y los tiempos de cocción de los ladrillos.

Etapa II

Se correlaciona información concerniente con la disponibilidad del recurso energético (leña y biomasa residual) y el precio. Se establecieron indicadores de costos exergéticos unitarios (\$/kWh) por cada ladrillo.

Etapa III

Se evaluaron las condiciones técnicas de los hornos actuales y se propusieron modificaciones como el uso de biomasa residual de aceite de palma

Dentro de este análisis se tuvo en cuenta el consumo de biomasa residual, esto garantiza la aplicabilidad de un nuevo método para determinar las pérdidas energéticas y un modelo óptimo que arroje un mejor uso de la energía; teniendo en cuenta los factores externos como el ambiental y los costos del combustible.

Etapa IV

Con los datos y análisis de las etapas anteriores, se adaptó un código de algoritmos evolutivos, basados en las contribuciones de Bejan et al (1996), Tsatsaronis (1993), Sahoo (2007), Bastidas et al (2010), para los requerimientos en la optimización de un sistema energético complejo y se modificó para la evaluación de varias funciones objetivos simultáneamente. Esto para observar la variación de una función objetivo con respecto al cambio o a la variación de las demás funciones objetivos.

Modelo de optimización

Es utilizado un modelo de optimización basado en 2 funciones objetivo, las cuales tienen integradas por las variables y los parámetros que se enuncian a continuación:

Tabla 1 Parámetros requeridos por los objetivos del problema

PARÁMETRO	VALOR			FUENTE
Precio producto (ladrillo)	\$ 220			Encuesta a ladrillero
Poder Calorífico (KJ/Kg)	Cuesco 16685,79	Raquis 16823,86	Fibra 17882,42	Atlas de biomasa
Masa total combustible	0,14 Kg/s			Encuesta ladrilleros
Tiempo de operación	86400 seg			Encuesta ladrilleros
Energía cocción ladrillos	4 KW			EELA
Costo exergético combustible	Cuesco	Raquis	Fibra	Atlas biomasa

	0.00539	0.0059	0.00513	
Cenizas emitidas combustible	Cuesco	Raquis	Fibra	Atlas biomasa
	0.0762	0.0958	0.0716	

Fuente: Atlas Biomasa, EELA

A continuación se enuncian las variables que se obtienen el proceso de optimización

Tabla 2 Variables del proceso de optimización

VARIABLES	RANGO
Fracción Combustible	0-1
Eficiencia Potencial de Ingresos	0-1
Generación cenizas mezcla	>0

Fuente: Elaboración propia

Objetivo termoeconómico

En este objetivo se maximizó la eficiencia potencial de ingresos, descrita del siguiente modo (Bejan et al, 1996), (Tsatsaronis, 1993), (Bastidas et al 2010):

$$\varepsilon_{PI} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - \left(\frac{E_p}{m_T (\sum X_{CBi} \cdot PC_i)} \right)}{\frac{E_p}{m_T (\sum X_{CBi} \cdot PC_i)}} \right) \frac{C_F}{P_P}} \quad (8)$$

donde P_p representa el precio del producto, que en este caso es el precio venta de los ladrillos y $C_F = \frac{\$/Kg}{PC_i}$ que determina la relación entre el precio por kilogramo del combustible y su poder calorífico.

Además se determina la eficiencia exergética del proceso, que es función de la exergía del producto (transferida al ladrillo) y la exergía contenida en el combustible que alimenta el sistema, m_T es el flujo másico total de combustible y $\sum X_{CBi} \cdot PC_i$ es el poder calorífico de las fracciones de combustible (Bejan et al, 1996; Tsatsaronis, 1993; Bastidas et al 2010).

Objetivo ambiental

Se determina la cantidad másica de cenizas que se generan por la combustión de la biomasa utilizada en la cocción del ladrillo, tal como se aprecia en la ecuación 9. En este caso se toma la fracción de cenizas que contiene cada combustible propuesto.

$$m_Z^A = \tau \cdot \dot{m}_\tau (\sum X_{CB,i} \cdot Y_i) \quad (9)$$

Proceso de optimización multiobjetivo por medio de algoritmos genéticos

Se lleva a cabo el proceso de optimización en el marco de los objetivos termoeconómico y ambiental descritos en la metodología, teniendo en cuenta las restricciones descritas en la siguiente tabla:

Tabla 3. Restricciones de optimización del algoritmo

Parámetro	Valor
Número de individuos de las poblaciones	100
Probabilidad de cruce	0.9
Probabilidad de mutación	0.9
Número de generaciones a obtener	200

Fuente: Elaboración propia

Aplicación de algoritmos evolutivos

La presencia de múltiples objetivos en un problema, además de requerir un método de resolución no convencional, da lugar a un grupo de soluciones óptimas conocidas ampliamente como soluciones óptimas de Pareto (Alvarado et al, 1994; Smith et al., 2000).

Se emplean algoritmos genéticos en este caso para construir un grupo de soluciones cercanas al óptimo, donde se parte de soluciones factibles teniendo en cuenta la optimización de los objetivos ambiental y termoeconómico que arrojaran unas fracciones por tipo de combustible. Luego se seleccionan los individuos de mejor calidad, es decir, la mezcla de combustible que representen mayor eficiencia potencial de ingresos y menor generación de cenizas y los inserta en la siguiente generación, como se muestra en la Figura 2.

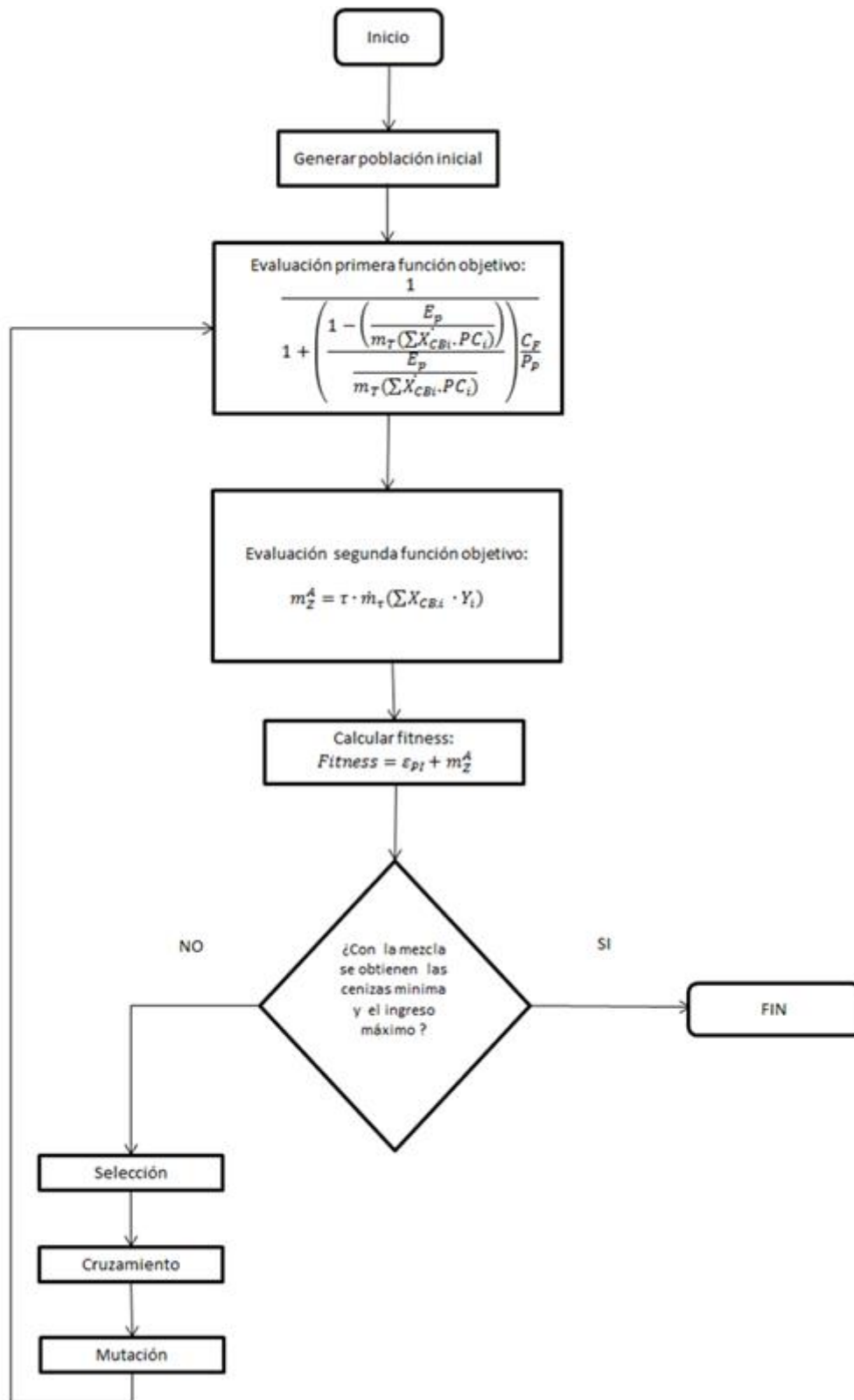


Figura 2. Diagrama de flujo de Algoritmo Genético
Fuente: Elaboración propia

En este caso los criterios que se tienen en cuenta son las funciones objetivos descritas anteriormente, tal como se expresa en la ecuación 11:

$$Fitness = \varepsilon_{PI} + m_Z^A \quad (11)$$

La implementación del algoritmo genético se desarrolló con un ambiente del software profesional MATLAB incluyéndole algunos códigos implementados en lenguaje C++.

Determinación de diferencia significativa entre costos exergéticos de combustible.

Se determinó si existía diferencia significativa entre los costos exergéticos de la madera que es el combustible tradicional y las mezclas de biomasa obtenidas mediante el proceso de optimización; para esto se realiza una prueba de hipótesis donde se proponen las siguientes hipótesis:

H₀: No hay diferencia significativa entre los costos exergéticos de la madera y las mezclas de biomasa

H_a: Si hay diferencia significativa entre los costos exergéticos de la madera y las mezclas de biomasa.

Esta determinación se realiza con $\alpha=0,05$ y aplicando el estadístico de prueba t de student:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S/\sqrt{n}}$$

Con los valores del costo exergético promedio de las mezclas biomasa optima: \bar{X} : (*costo exergético promedio de las mezclas de biomasa*) y $\mu_0 = 0,00642857$ (*costo exergético madera*), utilizando el software Excel en su opción de análisis de datos se obtiene y analiza el valor de P.

Etapa V

Presentación y discusión de resultados, donde se conceptúa respecto de la posibilidad de cambiar el combustible tradicional que es la madera por la mezcla de biomasa residual de palma de aceite y en que proporciones se debe utilizar cada tipo de residuo.

Capítulo II

5. Resultados y discusión

Descripción proceso cocción de ladrillos artesanales en el corregimiento de El Cielo y Las Casitas

La cocción de los ladrillos que se producen de manera artesanal en los corregimientos de El Cielo y las Casitas del municipio de Valledupar se lleva a cabo en hornos intermitente tipo Pampa.

Los productos, la instalación de la cocción y la de enfriamiento quedan en posición fija durante todo el ciclo, en el cual se apilan los ladrillos moldeados con arcilla como se muestra en la Figura 3, previamente secados al sol; estos hornos poseen unas bóvedas en la parte inferior, por los cuales se introduce el combustible a quemar.



Figura 3. Levantamiento horno

Fuente: Elaboración propia

Se pudo determinar que el tiempo de cocción de los ladrillos es de 24 horas, en las cuales un obrero suministra el combustible necesario para garantizar la continuidad del proceso. La producción declarada por los alfareros fue en promedio de 10.000 ladrillo/horno mensual, se estima que en el sector de Las Casitas se producen aproximadamente 1.500.000 ladrillos/mes.

Características del combustible utilizado

El combustible utilizado en la cocción de los ladrillos es Algarrobillo (SamaneaSamán), la cual se observa en la Figura 4 (Rudas et al, 2014), para la producción de 10.000 ladrillos, es decir la carga de un horno, se emplean en promedio 4.700 Kg de madera, la cual es obtenida de los bosques cercanos, esto se traduce en la deforestación de 1,92 Hectáreas de bosque.

Tabla 4. Características energéticas del algarrobillo (samaneasaman)

CARACTERISTICAS ENERGÉTICAS DEL ALGARROBILLO	
Poder calorífico inferior	14000 KJ/Kg
Carbono	46,62%
Hidrógeno	5,73%
Nitrógeno	0,2%
Oxígeno	32,56%

Fuente: (Corpocezar, 2010), (Cabrera et al, 2010)



Figura 4. Leña utilizada como combustible en cocción de ladrillos

Fuente: elaboración propia

Costo exergético del combustible

Se evalúa además los costos asociados al combustible actual por medio de la determinación del costo exergético, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5. Costo exergético del combustible actual

Biomasa	Precio (\$/Kg)	Costo exergético (\$/KJ)
Madera	90	0.00642857

Fuente: Elaboración propia

Balances de masa y energía del proceso de cocción del ladrillo

Teniendo en cuenta las características de la leña utilizada para la cocción de ladrillos y su composición, se presenta a continuación en la Figura 5 el balance de masa del proceso.

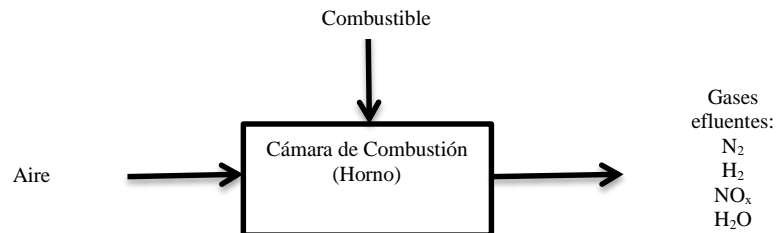
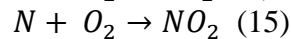
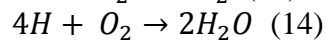
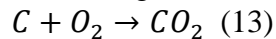


Figura 5. Diagrama proceso cocción de ladrillo

Fuente: Elaboración propia

En este proceso se lleva a cabo el proceso de combustión, que según las características de la leña anteriormente descritas, se dan las siguientes reacciones:



A partir de estas reacciones de combustión y teniendo como base de cálculo la cantidad de madera utilizada por horno para la producción de 10.000 ladrillos (Batch), se determinaron las cantidades de gases efluentes de la cámara de combustión (horno).

Tabla 6. Composición del combustible (madera)

Composición del combustible	
Elemento	Porcentaje
Carbono	46.62
Nitrógeno	5.73
Hidrógeno	0.2
Oxígeno	32.56
Cenizas	14.89

Tabla 7. Elementos de entrada al horno

Entrada en el horno	
Cantidad de madera por batch	
4.700 Kg	
Elemento	Kilogramo
Carbono	2191.14
Hidrógeno	269.31
Nitrógeno	9.4
Oxígeno	8.14
Aire seco 20% en exceso	
Elemento	Porcentaje
Nitrógeno	79%
Oxígeno	21%

Tabla 8. Elementos de salida del horno

Gases efluentes del horno	Kilogramos
CO ₂	8034.18
H ₂ O	201.9825
NO ₂	36.033
N ₂	23888.20
O ₂	26.048

Fuente: Elaboración propia

El balance de energía de la cámara de combustión queda descrito de la siguiente manera:

$$m_{aire}E_{aire} + m_f Pc - m_g \overline{Cp_g} \Delta T_g = m_l E_l \quad (16)$$

Donde

$$E_{aire} = Cp_{aire} \Delta T_{aire} \quad (17)$$

$$\Delta T_{aire} = (T_{salida} - T_{entrada}) \quad (18)$$

$$\Delta T_g = (T_{salida\ gases} - T_{ambiente}) \quad (19)$$

m_{aire} : Masa de aire que entra al horno

m_f : Masa del combustible (leña) que se quema en el horno

Pc : Poder calorífico del combustible (leña)

m_g : Masa de gases efluentes

$\overline{Cp_g}$: Capacidad calorífica ponderada de los gases efluentes

m_l : Masa batch ladrillos

E_l : Energía transferida a los ladrillos

Los datos medidos en los hornos ubicados en las Casitas y el Cielo se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla 9. Datos medidos en el horno

Condiciones de operación del horno	
Temperatura ambiente promedio °C	35
Temperatura de salida gases promedio °C	180
Cp ponderado gases efluentes KJ/Kg.K	0.91135

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos y con las ecuaciones planteadas anteriormente obtenemos que:

$Q_{transferido\ ladrillos} = 364000$ KJ, esto para el batch de 10.000 ladrillos

La energía que entra debido al combustible es de 65.800.000 KJ, luego para la cocción del ladrillo se está aprovechando efectivamente el 3% de la energía entregada por el combustible.

La energía que sale en los gases de combustión es de 6306621,07 KJ en un batch de ladrillos

Propuesta de mejoramiento tecnológico

Teniendo en cuenta las mediciones de temperatura de gases que se realizaron en los hornos, se determinó que la temperatura de los gases efluentes de la cámara de combustión del horno es en promedio de 250°C; a partir de esto se propone un esquema de aprovechamiento de la energía contenida en estos gases calientes del siguiente modo:

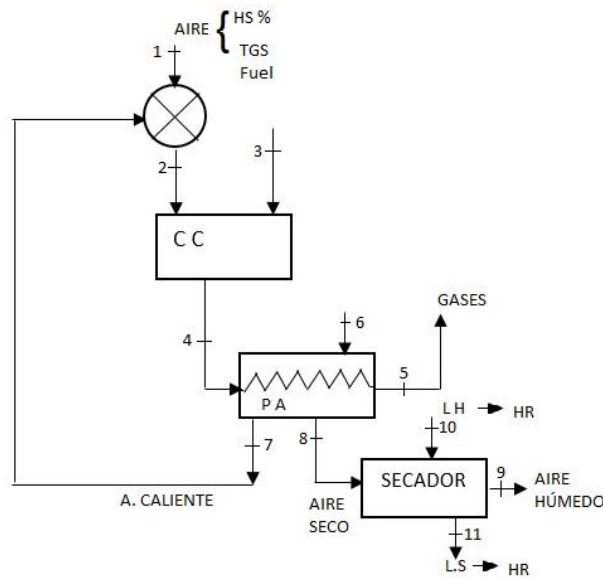


Figura 6. Propuesta de modelo de aprovechamiento energético
Fuente: Elaboración propia

En este modelo se aprovecha el calor contenido en los gases efluentes de la cámara de combustión para calentar aire que luego pasaría a un secador, donde están contenidos los ladrillos recién moldeados para de este modo agilizar el proceso de secado. La otra parte del aire caliente llega hasta un mezclador donde se mezcla con aire a temperatura ambiente, precalentándolo antes de entrar a la cámara de combustión con el fin de mejorar las condiciones en la combustión.

Además se propone el cambio de leña como combustible por los residuos de palma de aceite, esto teniendo en cuenta que el Departamento del Cesar tiene un potencial energético de biomasa residual de palma de aceite de 2.020 TJ/año (Escalante et al, 2010). Los subproductos que presentan un poder calorífico considerable son el cuesco, raquis y la fibra; cuyas características se presentan a continuación:

Tabla 10. Poder calorífico de biomasa residual de palma (Escalante et al, 2010)

Biomasa	Poder calorífico (KJ/Kg)
Cuesco	16685.79
Raquis	16823,86
Fibra	17882.42

Costo exergético del combustible

Se evalúa además los costos asociados al combustible actual y a los residuos de palma por medio de la determinación del costo exergético de cada uno, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11. Costo exergético biomasa residual de palma

Biomasa	Precio (\$/Kg)	Costo exergético (\$/KJ)
Cuesco	90	0.005393811
Raquis	100	0,00594393
Fibra	95	0,005134800

Fuente: Elaboración propia

Evaluación de la convergencia de las funciones objetivo planteadas

En primera instancia se evalúan las funciones objetivo, para determinar que la población este convergiendo hacia una solución óptima del problema.

Función objetivo 1:

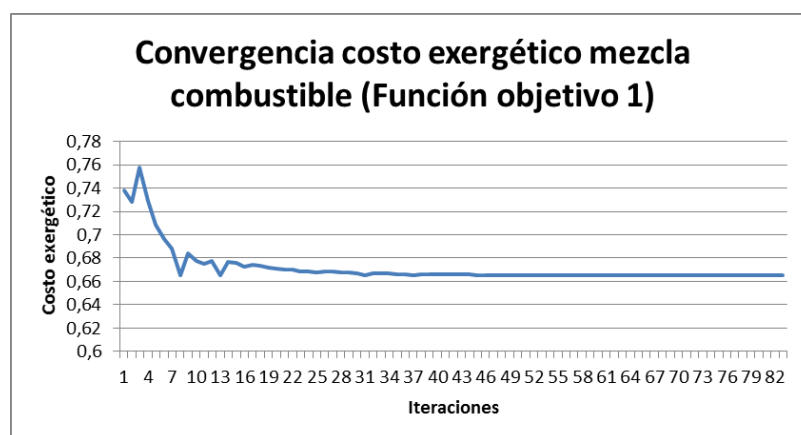


Figura 7. Evaluación de la convergencia de la función objetivo 1

Fuente: Elaboración propia

Función objetivo 2

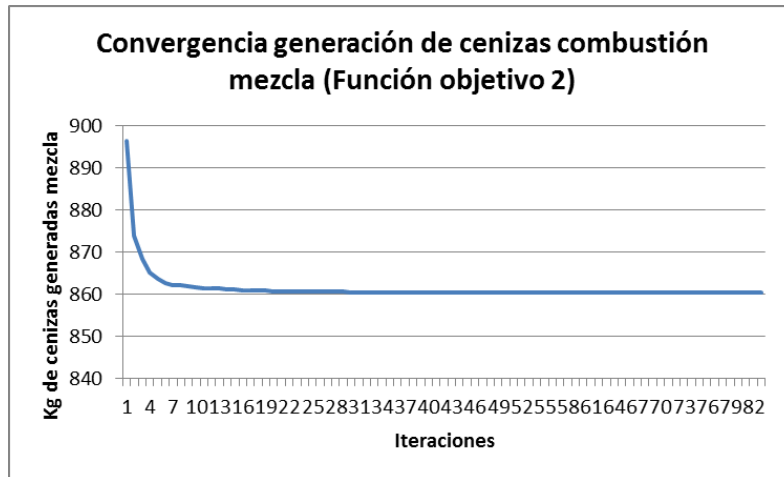


Figura 8. Evaluación de la convergencia de la función objetivo 2

Fuente: Elaboración propia

Resultado evaluación del proceso de optimización

Ejemplo solución

Se escoge aleatoriamente fracciones para la mezcla de combustible a partir de biomasa residual:

$X_1=0,5$ (Cuesco)

$X_2=0,4$ (Raquis)

$X_3=0,1$ (Fibra)

Con esta mezcla se evalúan las funciones objetivo:

$$\varepsilon_{PI} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - \left(\frac{E_p}{m_T (\sum X_{CB,i} \cdot PC_i) \right)}{\frac{E_p}{m_T (\sum X_{CB,i} \cdot PC_i)}} \right) \frac{C_F}{P_P}} = 0,56666178$$

$$m_Z^A = \tau \cdot \dot{m}_\tau \left(\sum X_{CB,i} \cdot Y_i \right) = 982.437.120$$

Con este resultado y 199 obtenidos de diferentes fracciones de combustible compiten para determinar cuales son las que más se ajustan a las condiciones del algoritmo, que en este caso es la minimización de la emisión de cenizas y la maximización del ingreso.

Se observa como resultado de la optimización las fracciones de cada tipo de combustible que debe usarse en la combustión, además de la eficiencia potencial de ingreso de la mezcla óptima y los kilogramos de cenizas que genera el proceso.

Tabla 12. Resultados de optimización

Mezclas	Fracción Raquis	Fracción Cuesco	Fracción Fibra	Función Objetivo 1	Función Objetivo 2	Función Objetivo General
M ₁	0,177436	0,589424	0,233141	0,654049	1.036.919.556	1.036.919.556
M ₂	0,060737	0,469634	0,469629	0,781411	1.000.137.878	1.000.137.878
M ₃	0,060736	0,469634	0,46963	0,781411	1.000.137.817	1.000.137.817
M ₄	0,49878	0,002443	0,498777	0,779784	863.168.701	863.168.701
M ₅	0,114025	0,004318	0,881657	0,665368	860.938.843	860.938.843

Fuente: Elaboración propia

Después de las 200 generaciones que obtiene el algoritmo, este da como resultado 5 mezclas óptimas de cuesco, raquis y fibra.

Las mezclas correspondientes a M₄ y M₅ es donde menos cantidad de cenizas se genera producto de la combustión de la biomasa. En M₁ es donde mayor cantidad de cenizas se obtiene y además la eficiencia potencial de ingresos es la menor; mientras que M₂, M₃ y M₄ tienen la mejor eficiencia potencial de ingresos.

En las mezcla donde se usa mayor proporción de fibra se observa menor generación cenizas, esto se debe a que la fibra es la biomasa que en la combustión genera menor cantidad de cenizas (Escalante et al, 2010).

Se obtiene mayor eficiencia potencial de ingresos cuando la fibra y el raquis se encuentran en proporciones similares en la mezcla.

Evaluación costo exergético mezcla

Se compara mediante prueba de hipótesis aplicando t de student la diferencia entre el precio del combustible utilizado comúnmente que es la madera y las mezclas óptimas encontradas por el algoritmo y determinar si es significativa la diferencia entre estas.

Con los valores: $\bar{X} =$

0,0054305060351088 (*costo exergético promedio de las mezclas de biomasa*), $S =$ 0,000204751, $n = 5$ y $\mu_0 = 0,00642857$ (*costo exergético madera*); se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 13 Resultado prueba de hipótesis con estadístico t de Student

Prueba estadística	Valor
Media	0,00543051

Varianza	4,1923E-08
Observaciones	5
Coefficiente de correlación de Pearson	0,21661059
Grados de libertad	4
Estadístico t	-10,4637564
P(T<=t) una cola	0,00023571
Valor crítico de t (una cola)	2,13184679
P(T<=t) dos colas	0,00047142
Valor crítico de t (dos colas)	2,77644511

Fuente: Elaboración propia

Tomando un valor de $\alpha = 0,05$ se observa que $p\text{-value} < \alpha$, luego existe una diferencia significativa entre el costo de la madera y los costos exergéticos de las mezclas obtenidas en la optimización; determinando así que las mezclas obtenidas en la optimización tienen estadísticamente menor costo exergético en comparación con la madera, lo que convierte en un potencial sustituto de este combustible tradicionalmente utilizado en esta región.

6. Conclusiones

El análisis multiobjetivo permite establecer relaciones entre características provenientes del entorno del sistema, teniendo en cuenta el interés del evaluador.

Estos resultados permiten evaluar de una forma global la utilización de una mezcla de combustibles nuevos en este proceso, teniendo en cuenta los ingresos generados luego de los cambios introducidos, así como su impacto sobre el medio ambiente según la producción de residuos de combustión.

Se observa que el costo exergético de los residuos de palma es menor que el del combustible utilizado actualmente y que estos tienen mayor poder calorífico. Además resulta viable el cambio de combustible además de contribuir al desarrollo sostenible que porque contribuiría a bajar la deforestación debida a la utilización de madera como combustible.

El proceso de cocción de ladrillos en este tipo de horno presenta un aprovechamiento de sólo un 3% de la energía contenida en el combustible.

Se plantea el aprovechamiento de los gases efluentes de la combustión para el secado de los ladrillos, de este modo se recupera y aprovecha la mayor cantidad de calor aportado por el combustible y recuperar el calor sensible de los gases de escape para el secado de las piezas crudas.

Se evidencia convergencia tanto en la función ambiental como la termoeconómica, indicando que el proceso de optimización se está llevando a cabo de manera satisfactoria.

Al obtener las fracciones de cuesco, raquis y fibra óptima para el proceso de combustión, se tiene una idea clara de las cantidades de cada tipo de residuo que se debe utilizar en la combustión teniendo en cuenta los costos de los combustibles y la generación de cenizas en la combustión.

La diferencia significativa encontrada entre el costo exergético de las mezclas de biomasa y el de la madera denota que el cambio del combustible tradicional a biomasa residual representa un ahorro económico en el proceso de combustión.

7. Recomendaciones

Se propone el diseño y puesta en marcha de una planta piloto donde se evalúe el aprovechamiento de los gases efluentes de la combustión en el proceso de secado de los ladrillos.

A partir de los resultados obtenidos se sugiere la realización de ensayos de utilización de las mezclas de combustibles para validar experimentalmente los resultados obtenidos en la optimización. Además se plantea la posibilidad de densificar los residuos para construir briquetas con las proporciones ya establecidas y evaluar la eficiencia de la combustión del material densificado; por otra parte determinar si la densificación facilita el transporte y uso de la biomasa para la cocción de los ladrillos.

Se recomienda ampliar la investigación teniendo en cuenta como factor de decisión las emisiones de gases que se presenten en la combustión de la biomasa, determinando de este modo la calidad y cantidad de gases efluentes y sus posibles repercusiones sobre el medio ambiente.

Se sugiere utilizar esta investigación como insumo en la construcción del Plan Energético Rural Sostenible que se está formulando en el departamento del Cesar, el cual busca mejorar la competitividad energética de la región.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarado,S., C. Gherardelli. (1994). Input-Output Exergo Economic Optimization of Multicomponent Multiproducts Systems Methodology. Energy. Vol. 19. pp 251-258.

Areiza Martínez, R. A. (2014). Modelado, simulación y desarrollo de un análisis de eficiencia energética en un horno ladrillero tipo bóveda en condiciones de estado estacionario. Retrieved from <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/4971>.

Bastidas Barranco, M. J., & others. (2010). Análisis multiobjetivo para la optimización en sistemas de generación de energía. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/2360>

Bastidas, Marlon J, Bermúdez, Raúl F, Jaramillo, Gloria P, & Chejne, Farid. (2010). Optimización Termoeconómica y Ambiental usando Algoritmos Genéticos Multiobjetivo. Información tecnológica, 21(4), 35-44. Recuperado en 23 de abril de 2015, de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642010000400006&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0718-07642010000400006.

Cámara de Comercio de Bogotá. (2011). Programa de eficiencia energética en ladrilleras artesanales de América Latina para mitigar el cambio climático – EELA. Nemocón.

Campos, J., Lora, E., Merino, L., Tovar, I., Navarro, A., Quispe, E., Vidal, J., Lopez, Y., Castrillón, R., Prias, O. (2008). Ahorro de energía en la industria cerámica. UPME.

Cárdenas B., Aréchiga, U., Munguía J.L., Márquez C., Campos, A. (2012). Evaluación preliminar del impacto ambiental por la producción artesanal de ladrillo: cambio climático, eficiencia energética y calidad del aire. Informe Final del Convenio de Colaboración INE/ADA-013/2009. Versión Actualizada Junio 2012. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa y el Instituto Nacional de Ecología. México D.F. pp44.

Corporación ambiental empresarial CAEM. (2011) Estudio tecnológico para definir el tipo de tecnología de horno apropiada para la reconversión de las ladrilleras artesanales, ingeniería básica y supervisión del montaje.

DANE (2005). Censo General. Retrieved from: <https://www.dane.gov.co/censo/files/libroCenso2005nacional.pdf>

EELA (2011). Caracterización de los hornos usados en la industria ladrillera. Proyecto Colombia. Retrieved from: <http://www.caem.org.co/img/Hornos.pdf>

Escalante Hernández, H. (2010). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. [Bogotá]: Unidad de Planeación Minero Energética : Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales : Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación Colciencias : Universidad Industrial de Santander.

Garduno-Ramirez, R. y Lee, K.Y. (2001) Multiobjective optimal power plant operation through coordinate control with pressure Set point scheduling, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 16, No. 2, 115-122, (2001).

Gomez, C (2010). Modelamiento y simulación de un horno túnel industrial. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1882/1/71265369.2010.pdf>

Lezcano, D. (2012) Estudio exergético para identificar y evaluar potencialidades en energías renovables en el territorio colombiano, para planeamiento energético en periodos futuros. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from: <http://www.bdigital.unal.edu.co/5876/1/8161669.2012.pdf>

Lozano, A., Valero, A. (1993) Theory of the Exergetic Cost. Energy Vol. 18. No. 9, pp 939 - 960. Great Britain.

Meyer L., Tsatsaronis G., Buchgeister J., Schebek L. (2009). Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. Energy. No. 34 , 75–89.

Moro, B.(2010). Cesar. Análisis de Conflictividad. Retrieved from <http://www.undp.org/content/dam/undp/documents/projects/COL/00058220/Analisis%20Cesar%20Definitivo%20PDF.pdf>

Paulus D., Tsatsaronis G. (2006) Auxiliary equations for the determination of specific exergy revenues. Energy. Vol. 31. pp. 3235 – 3247.

Prevención de la Contaminación en el Sector Cerámico Estructural. (2006). Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL). Plan de Acción para el Mediterráneo. España.

Rudas, A., Padilla., Arias, A. (2014). Evaluación Del Rendimiento Energético Y Consumo De Madera Como Combustible Utilizado En El Proceso De Cocción De Ladrillos, En Las Ladrilleras Artesanales De La Vereda Las Casitas Del Municipio de Valledupar. Revista Colombia Forestal Vol 17. Slup 1.

Sanchez, T; Ramirez, S. (2002). Uso de cascarilla de arroz como fuente energética en ladrilleras “Una experiencia piloto desarrollada por ITDG-Perú” Programa de Energía, ITDG-Perú. Retrieved from: http://cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/24bib_arch.pdf

Sahoo P.K. (2007). Exergoeconomic analysis and optimization of a cogeneration system using evolutionary programming. Applied Thermal Engineering. pp. 1 – 9.

Smith, R y otros, (2000) Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Toffolo A. y Lazzaretto A. (2002). Evolutionary algorithms for multi-objective energetic and economic optimization in thermal system design, Energy., Vol. 27., pp. 549–567.

Tsatsaronis G. (2007). Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. Energy, Vol. 32, p 249–253. Germany.

Unidad de Planeamiento Minero Energético. (2001). Determinación de la Eficiencia Energética del Subsector Industrial de Ladrillo, Vidrio y Cerámica.