

**Propuesta de aprovechamiento de la energía
térmica contenida en los gases de
combustión de un horno industrial tipo
cubilote en la industria Mecanizamos Florián
Marín S.A.S.**

Presentado por:

Sebastián Leandro Sánchez García

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
Bogotá D.C.
2021**

**Propuesta de aprovechamiento de la energía
térmica contenida en los gases de combustión de
un horno industrial tipo cubilote en la industria
Mecanizamos Florián Marín S.A.S.**

Presentado por

Sebastián Leandro Sánchez García

Trabajo de grado para optar por el título de:

Ingeniero Ambiental

Director

Ing. Andrés Felipe Martínez

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
Bogotá D.C.
2021**

RESUMEN

En Colombia, un país en vía de desarrollo, los diferentes procesos industriales demandan cantidades cada vez más grandes de energía, por lo que es importante buscar alternativas que permitan mejorar la eficiencia de los procesos. En este documento se planteó una propuesta de ahorro y uso eficiente de la energía, la cual consiste en recuperar la energía térmica contenida en los gases de combustión producto de un proceso industrial de fundición de hierro. Se propone el aprovechamiento de estos gases residuales de combustión para reintegrarlos al sistema a fin de precalentar el aire con el que se alimenta el horno industrial donde se desarrolla la combustión. Dicho planteamiento contribuye a mejorar la eficiencia energética del proceso industrial en general, disminuye costos de producción en la empresa y ayuda a disminuir la huella de carbono de la compañía.

Palabras Clave: eficiencia energética, gases de combustión, ahorro y uso eficiente de la energía.

ABSTRACT

In Colombia, a developing country, the different industrial processes demand increasing amounts of energy, so it is important to look for alternatives to improve the efficiency of the processes. In this document a proposal for energy saving and efficient use of energy was proposed, which consists of recovering the thermal energy contained in the combustion gases resulting from an industrial iron smelting process. It is proposed to use these residual combustion gases to reintegrate them into the system in order to preheat the air used to feed the industrial furnace where combustion takes place. This approach contributes to improve the energy efficiency of the industrial process in general, reduces production costs in the company and helps to reduce the company's carbon footprint.

Key words: energy efficiency, combustion gases, energy savings and efficient use of energy.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la humanidad a lo largo de la historia siempre ha estado estrechamente ligado al consumo energético, fundamental para el crecimiento de las industrias, comercios a gran escala, vivienda y desarrollo de todo tipo de bienes y servicios; los últimos dos siglos específicamente se ha obtenido esta energía a partir de fuentes no renovables, dentro de las que se destacan el petróleo y sus derivados, el carbón mineral, el gas combustible y en menos proporción los recursos metalúrgicos [1]. Hoy en día se continúan empleando estos combustibles fósiles como fuente primaria de energía para cubrir los requerimientos térmicos de los procesos industriales y la demanda energética general de la población, lo cual con el paso de los años se ha vuelto un tema bastante polémico y que genera controversia entre la comunidad internacional ya que la puesta en marcha de estas prácticas genera enormes cantidades de CO₂ equivalente los cuales son emitidos a la atmósfera propiciando así el cambio climático [2].

En la actualidad, las alternativas de optimización de procesos energéticos son un tema de especial relevancia en Colombia, donde para el año 2017 el sector industrial consumió cerca del 27% de la energía eléctrica total consumida en el país [3]; en cuanto a la energía térmica existen determinados sectores que tienen un importante impacto en el consumo de dicho recurso, estos son los que involucran la manufacturación de alimentos, químicos, textiles, metalurgia, minerales no metálicos, refinerías y producción de papel y cartón, donde según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) para el año 2019 estas actividades industriales consumieron cerca del 88% de la energía térmica total generada en Colombia. [21]

Por lo tanto, las empresas que usan cualquier tipo de energía como principal insumo para sus procesos productivos están empezando a adoptar proyectos de eficiencia energética (EE) como la autogeneración, cogeneración y planes de ahorro y uso eficiente de la energía con el fin de sacar el máximo provecho posible a los recursos empleados y buscar una mayor competitividad en el mercado actual; ya que esto trae consigo beneficios como: minimización de costos fijos, incentivos tributarios por disminución de huella de carbono, aprovechamiento máximo de fuentes primarias de energía, reconocimiento a nivel empresarial, entre otros [4]. Por otro lado en industrias cuyo consumo energético es muy elevado se implementan planes de EE casi a manera de subsistencia, ya que su nivel de

producción se ve estrechamente ligado a los precios internacionales de las fuentes primarias de energía.

En países en vía de desarrollo como Colombia el consumo de combustibles fósiles sigue siendo el eje central del desarrollo nacional [3], es por ello que el Estado colombiano a través diferentes entidades gubernamentales como el Ministerio de Minas y Energía, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) busca estimular, promover e incentivar proyectos de autogeneración, cogeneración, ahorro y uso eficiente de la energía [5][6]. Aunque por otro lado el consorcio privado HART-RE presentó en 2014 un informe a la UPME en el que se concluye que el aprovechamiento de la energía contenida en los gases de escape y sistemas refrigerantes es casi nula en el país [7], lo cual supone un desperdicio importante de energía que se pierde en forma de calor, la cual podría estar siendo recuperada mediante sistemas de que permitan una mejora en la eficiencia energética de los procesos.

Cada vez es más frecuente la publicación de estudios que intentan demostrar la ineficacia de las grandes centrales de generación de energía y su futura inviabilidad [4][7], ya que estas requieren enormes obras de infraestructura, generan importantes impactos negativos al ambiente en su cadena de suministro, la distribución de la energía eleva los costos de producción y genera pérdidas importantes del recurso [8]; por lo que se propone desde la academia incursionar en métodos menos centralizados de producción de energía, ya que estos pueden presentar ventajas técnicas y económicas interesantes. Estos sistemas regularmente reciben el nombre de *Generación Distribuida* [9] y se aplican a proyectos de cogeneración, autogeneración y ahorro y uso eficiente de la energía, que entre otras cosas, aprovechan la energía térmica presente en los fluidos residuales de diferentes procesos industriales, caso de estudio del presente documento.

Si bien a nivel teórico hay un consenso global sobre este tipo de proyectos con sus ventajas y desventajas, en la práctica resulta bastante complejo realizar un análisis comparativo sobre cómo éstos han impactado en las economías mundiales y en el medio ambiente [10], ya que la cogeneración, la autogeneración y el ahorro y uso eficiente de la energía implica tener en cuenta las necesidades específicas de cada compañía.

En Colombia, la primera expedición regulatoria sobre temas de cogeneración fue en el año de 1996 aportada por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). [6][10] Pero no fue hasta tiempo después, con la entrada en vigor de la Ley N° 1215 de 2008 que se definió de manera explícita lo que se conocería como

cogeneración en el país: *“proceso de producción combinada de energía eléctrica y energía térmica, que hace parte integrante de una actividad productiva, destinadas ambas al consumo propio o de terceros y destinadas a procesos industriales o comerciales”*. [5] De igual forma la CREG mediante la resolución 030 de 2018 delimitó los proyectos de autogeneración a: *“Aquella actividad realizada por personas naturales o jurídicas que producen energía eléctrica principalmente, para atender sus propias necesidades* [14].

Aunque en el país ya existe un marco regulatorio robusto, en la práctica es muy poco lo que se está haciendo en cuanto al aprovechamiento de la energía presente en fluidos residuales.

Sin embargo, no en todas las industrias es posible realizar proyectos de cogeneración o autogeneración de energía eléctrica, los cuales son los más apetecidos en el mundo para recuperar energía residual [10]. Es por ello que se han desarrollado prácticas que permiten mejorar la EE de los procesos industriales, éstas se pueden aplicar a un mayor número de industrias y en algunas ocasiones requieren de actualizaciones tecnológicas. Un ejemplo de esto son las tecnologías de calentamiento que reducen el consumo de combustible, las cuales aprovechan el calor presente en los gases de escape para precalentar el aire utilizado para la combustión, aumentando el rendimiento de la reacción significativamente [15] y la EE del proceso industrial en general.

Bajo este contexto es de suma importancia que los gobiernos busquen orientar sus políticas y sus planes de desarrollo hacia un consumo más eficiente de la energía, ya que esto se traduce en alzas en la competitividad empresarial, desarrollo nacional y disminución en las cargas contaminantes aportadas al ambiente; un problema álgido en la actualidad [11].

Es por eso que este documento busca inicialmente analizar la viabilidad técnica y financiera de un sistema que permita precalentar el aire de alimentación de un horno industrial haciendo uso de la energía térmica presente en los gases de combustión que produce el mismo horno.

Con el fin de cumplir este objetivo, en primera instancia se realizó un diagnóstico detallado de la compañía donde se identificaron las fuentes principales de consumo de energía, los equipos industriales que la empresa emplea en su proceso productivo como también las cantidades y tipos de energía que se requieren. Posteriormente se estudiaron las oportunidades de mejora, es decir, se reconocieron las fuentes de energía residual ya que es allí donde puede haber un importante avance en la mejora de la eficiencia energética para la compañía. Por

último, se propuso un sistema el cual permita recuperar la energía térmica que actualmente la empresa está emitiendo a la atmósfera en forma de calor contenida en los gases de combustión, desperdiciando un así insumo crucial para el funcionamiento de la industria.

2. DIAGNÓSTICO

La empresa Mecanismos Florián Marín S.A.S se encuentra localizada en el municipio de Soacha, Cundinamarca. Esta industria se dedica principalmente a la fabricación y comercialización de autopartes y accesorios para vehículos, tales como discos y campanas, los cuales hacen parte del sistema de frenado en vehículos automotores.

2.1 Ubicación

El proceso productivo de Mecanismos FM se realiza en una planta de fundición ubicada en la KRA 90A # 10-45 en el municipio de Soacha, Cundinamarca, al sur de la ciudad de Bogotá D.C.

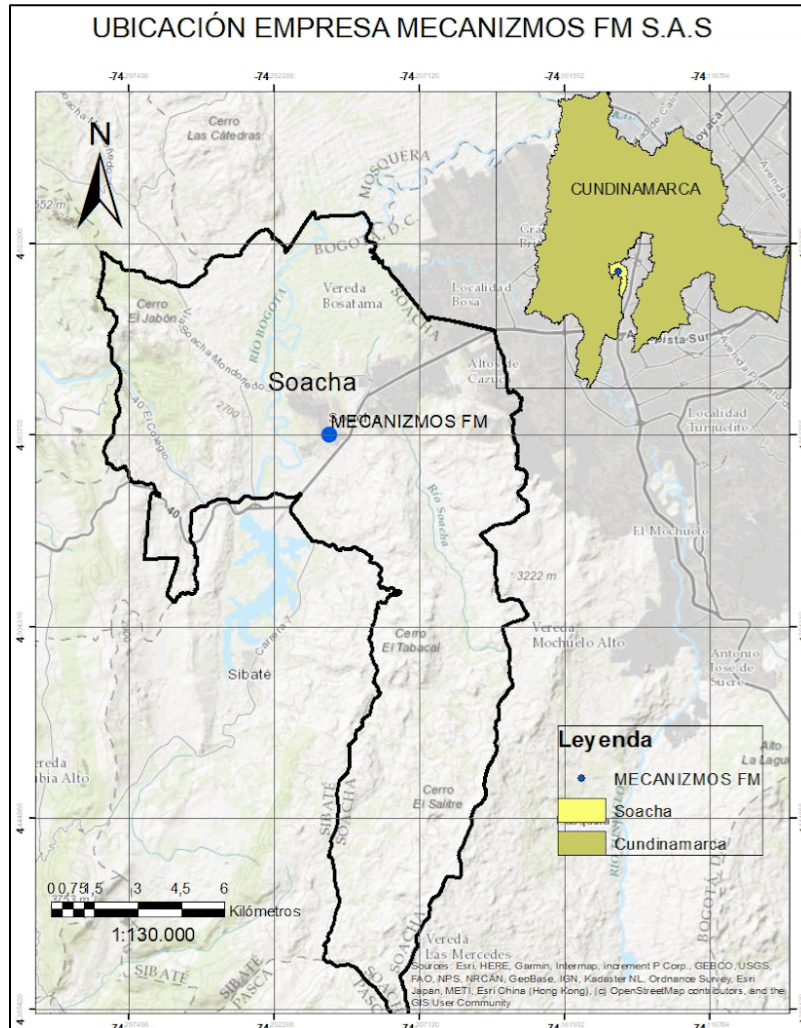


Imagen 1: Ubicación geográfica empresa Mecanismos FM S.A.S.

Fuente: Google Mapas.

2.2 Proceso productivo

La principal materia prima de la empresa es el hierro fundido gris, cabe resaltar que dicha materia prima no es virgen, la compañía compra trozos de metal de desecho los cuales requieren de un pre-tratamiento antes de entrar al proceso de producción, que consiste básicamente en retirar manualmente cualquier tipo de aleaciones de otros metales presentes en las piezas recicladas. El proceso se esquematiza en el siguiente diagrama de flujo de proceso:

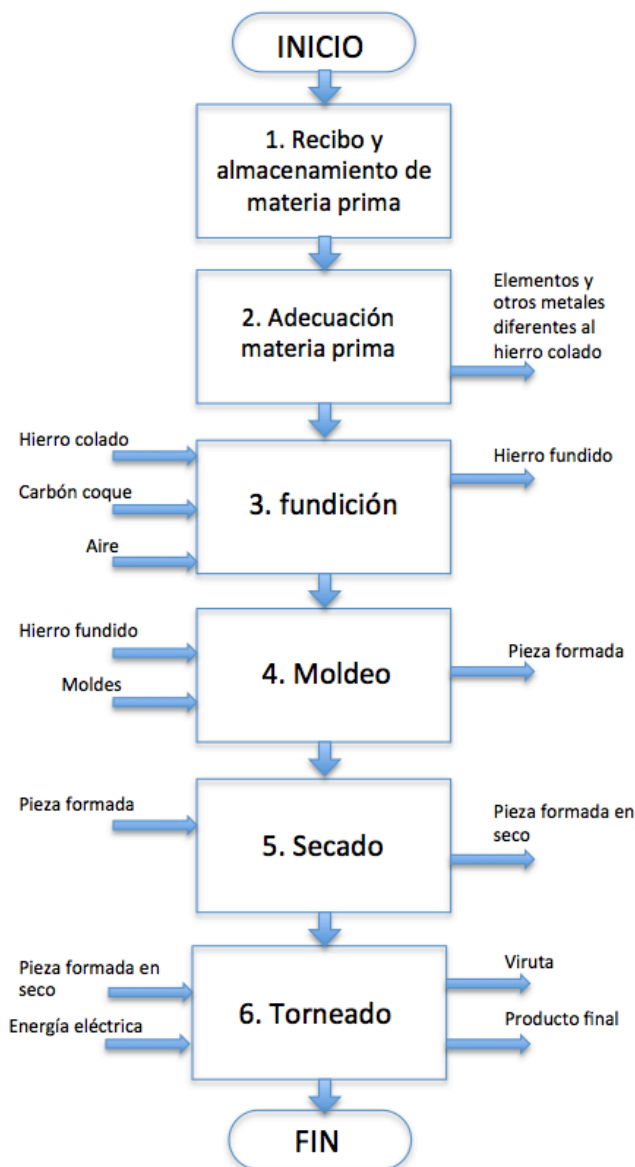


Diagrama 1: Diagrama de flujo de proceso industrial empresa Mecanizamos FM.

Fuente: Elaboración propia.

Cuando ya se tiene la materia prima limpia, es decir, piezas formadas únicamente con hierro gris, se procede a iniciar con el proceso de fabricación de discos y campanas. Para ello la empresa cuenta con un horno industrial tipo cubilote, el cual se esquematiza a detalle más adelante, éste emplea carbón coque como fuente de combustible y es el encargado de fundir el hierro proporcionándole energía térmica hasta alcanzar su punto de fusión, unos 1400°C, [12] una vez el hierro supera esta temperatura se procede a depositarlo en moldes los cuales dan la forma inicial a las autopartes.

Dichas autopartes poseen pequeños detalles en su diseño que no se pueden lograr únicamente con los moldes, es por ello que la compañía cuenta con tornos, que son máquinas metalmecánicas cuya función es dar un acabado preciso y así consolidar el producto final de la empresa. Estos tornos trabajan con el material a temperatura ambiente y se alimentan de energía eléctrica.

Ecomapa empresa Macanizamos FM S.A.S.

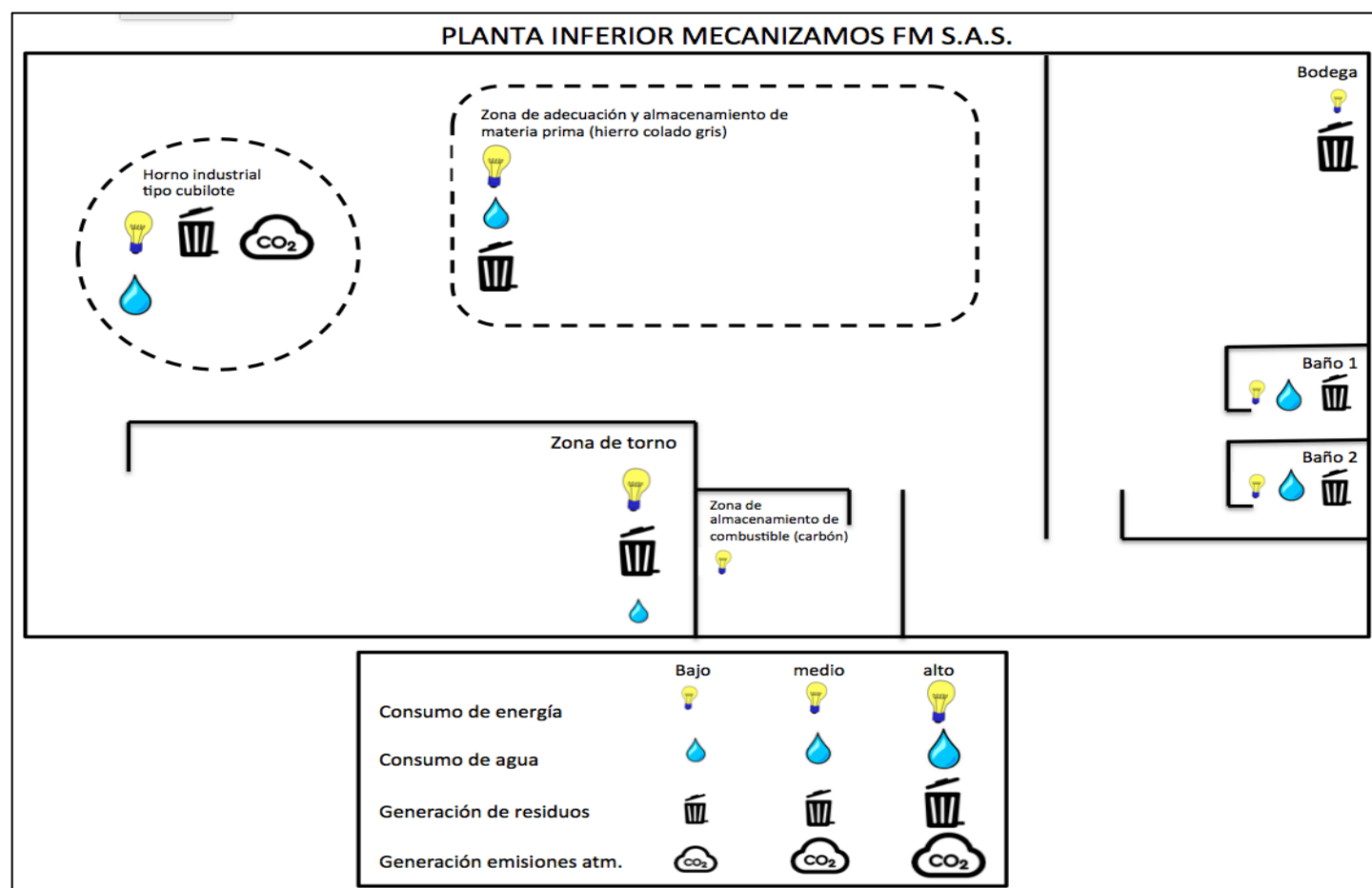


Imagen 2: Ecomapa planta inferior empresa Mecanizamos FM S.A.S.

Fuente: Elaboración propia.

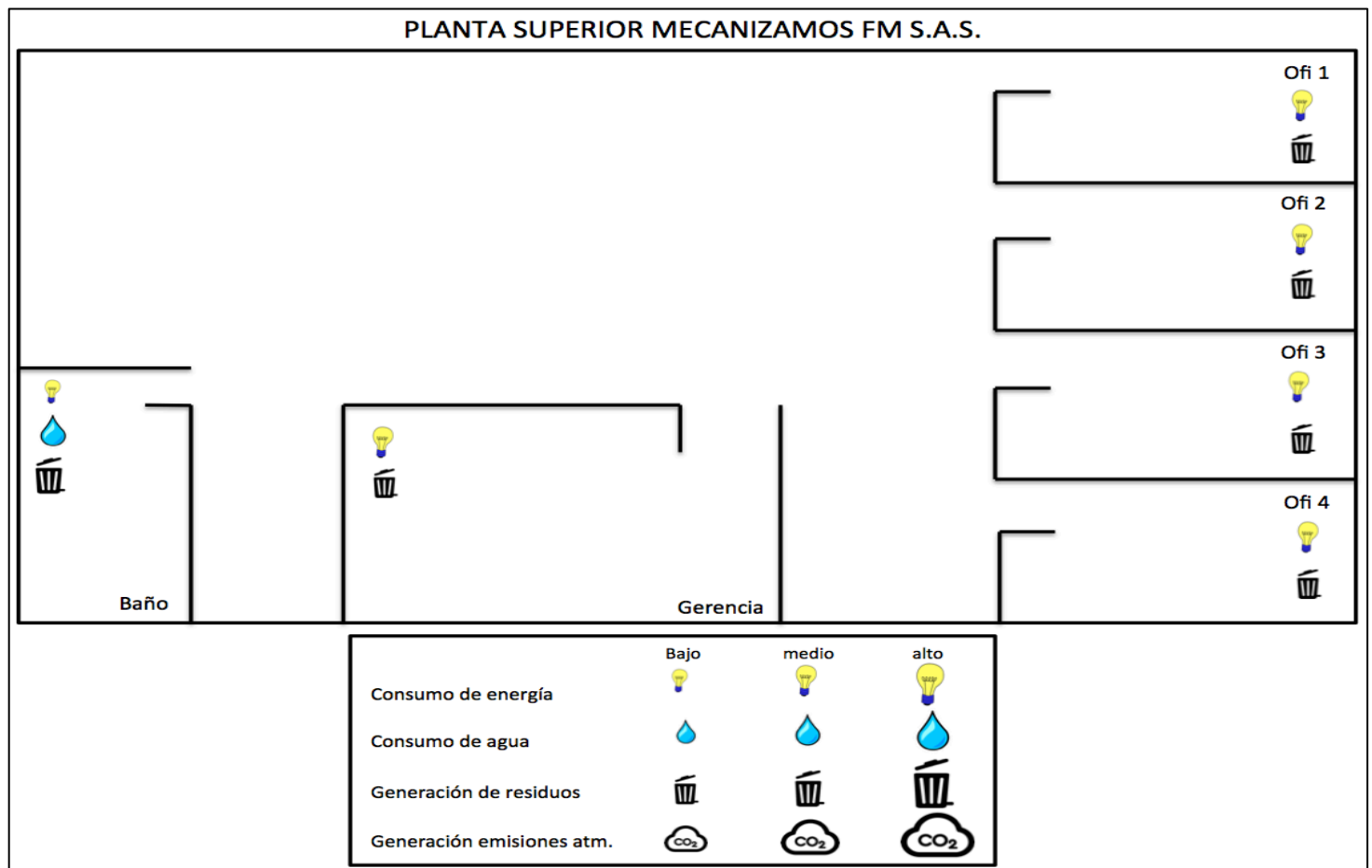


Imagen 3: Ecomapa planta superior empresa Mecanismos FM S.A.S.

Fuente: Elaboración propia.

En los anteriores ecomapas de la empresa Mecanismos FM S.A.S. se esquematizan los principales aspectos ambientales que la compañía genera en su proceso productivo.

En cuanto al recurso agua la empresa cuenta con un consumo medido de este líquido, donde su único punto sobresaliente es en el horno industrial ya que el sistema para el tratamiento de emisiones del mismo requiere agua para su funcionamiento, normalmente la empresa recolecta agua lluvia para este fin.

Igualmente la generación de residuos es moderada en la compañía, estos se generan principalmente en el proceso de adecuación de la materia prima, en el proceso de torneado, en el embalaje del producto final terminado y en general residuos provenientes de las actividades administrativas y de los baños. La empresa cuenta con convenios con recicladores particulares del sector para gestionar sus residuos metálicos.

Las emisiones atmosféricas si son un tema más relevante en la empresa, por lo que se tiene implementado un lavador de cámara por aspersión a fin de tratar dichas emisiones cumpliendo con la normativa nacional vigente, la Resolución 909 de 2008 expedida por el Ministerio de Ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial.

Por otra parte se logra identificar como el consumo de energía es el principal precursor de posibles impactos ambientales generados por la empresa, por lo que se puede decir que es allí donde existen importantes oportunidades de mejora en cuanto al consumo del recurso energético, esto se documenta de manera más detallada a continuación en el numeral 2.3.

2.3 Requerimiento energético

2.3.1 Energía eléctrica

La planta física de la compañía está dividida en dos secciones, en la parte delantera del predio se encuentra una edificación que consta de dos plantas: en el nivel superior se encuentra la zona administrativa y en la parte inferior están las bodegas donde es almacenado el producto final de venta. Allí hay un consumo de energía eléctrica moderado el cual consiste en iluminación para 5 oficinas y la bodega con luces fluorescentes LED, computadores e impresoras en cada oficina, un sistema de cámaras de vigilancia con TV y tres baños.

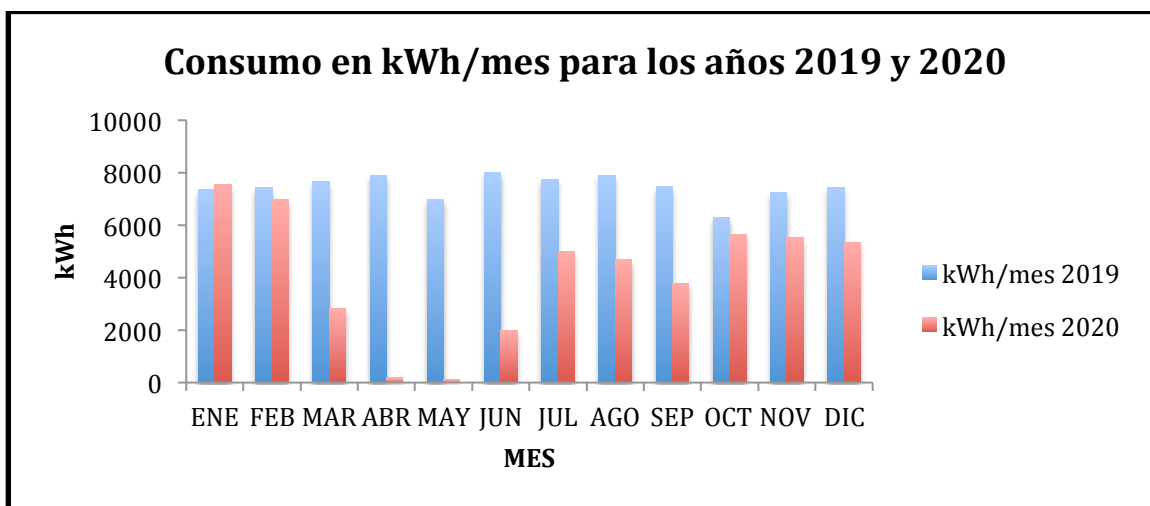
En la parte trasera de las instalaciones de la compañía es donde se lleva a cabo el proceso productivo, ahí se encuentra toda la maquinaria necesaria para la fabricación de las autopartes que consta de: dos cintas transportadoras de unos 10 metros, compresor para la alimentación de aire, motobomba empleada en el sistema de filtración de emisiones del horno industrial tipo cubilote, ocho (8) tornos convencionales y dos (2) tornos digitales.

Cabe resaltar que la empresa cuenta con un sistema de tratamiento de emisiones que consta de un lavador de cámara por aspersión el cual demanda energía eléctrica, ya que se debe bombear agua hasta la cima de la chimenea, 26 metros; para ello se usa la motobomba.

Todos los equipos anteriormente mencionados se alimentan únicamente de energía eléctrica y por ende es en esta sección de la industria en donde se presenta un consumo sustancial de electricidad. La empresa de servicios públicos

Enel-Codensa es la encargada de suministrar este insumo el cual se cobra en función de los kWh consumidos en el mes. (Gráfica 1, Gráfica 2)

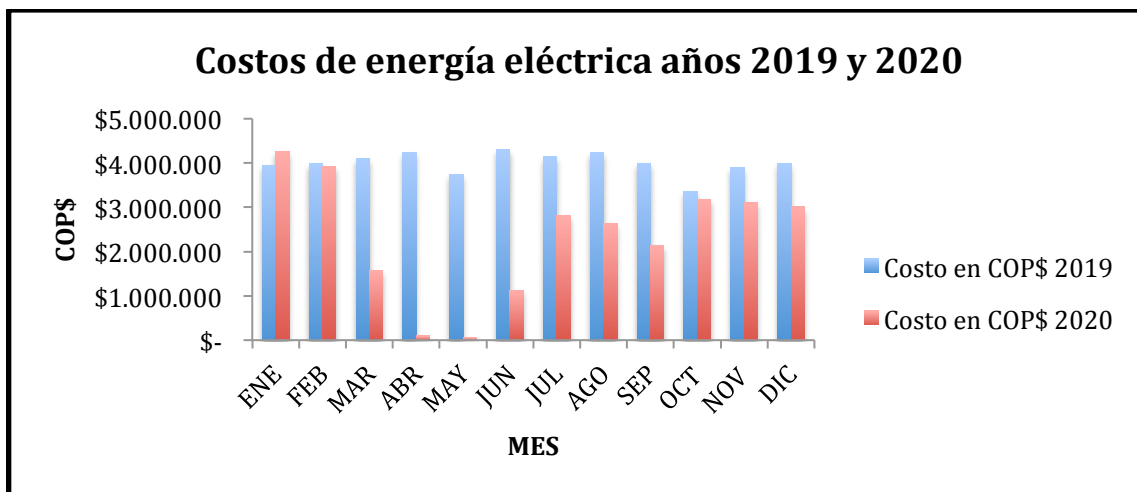
Es importante mencionar que los datos recopilados correspondientes al año 2020 se consideran atípicos debido a la pandemia mundial por la propagación de la COVID-19, por lo que se considera un año inusual para la compañía en donde su producción se vio fuertemente menguada, al igual que sus costos fijos.



Gráfica 1: Consumo de energía eléctrica en kWh de la empresa Mecanizamos FM S.A.S.

Fuente: Registros empresa, elaboración propia.

La compañía consumió en promedio unos 7451 kWh/mes y 4130 kWh/mes en los años 2019 y 2020 respectivamente. Teniendo acceso a los registros de la compañía se pudo establecer que en esos años el precio promedio del kWh fue de \$563,24 COP.



Gráfica 2: Costos en energía eléctrica de la empresa Mecanizamos FM S.A.S.

Fuente: Registros empresa, elaboración propia.

En 2019 la compañía pagó \$3'995.792 COP en promedio al mes en servicio público de energía eléctrica y en el consolidado del año los costos ascendieron a \$47'949.509 COP únicamente en consumo de energía eléctrica.

2.3.2 Energía térmica

La energía térmica es fundamental en el proceso de producción de la empresa Mecanizamos FM S.A.S. ya que esta es la encargada de hacer que el hierro colado gris alcance su punto de fusión. Está energía se obtiene a partir de carbón coque al cual se le proporciona aire con ayuda de un compresor para asegurar el proceso de combustión. El horno industrial tipo cubilote con el que cuenta la compañía es donde se realiza este proceso.

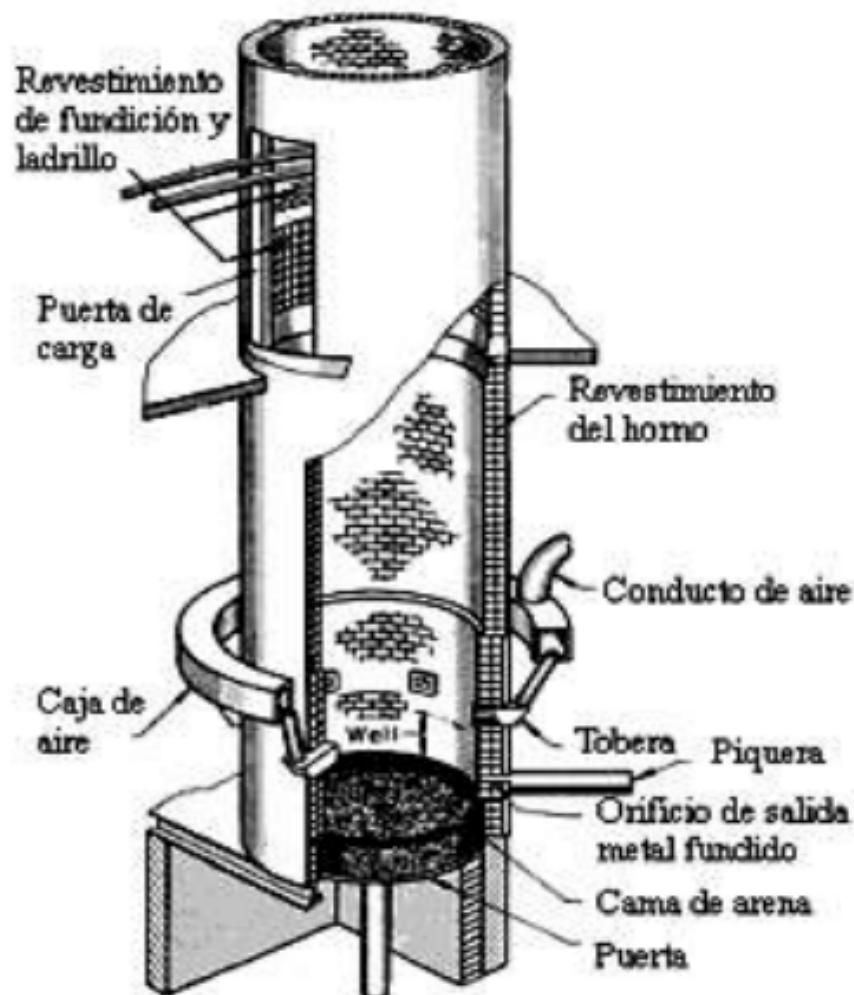


Imagen 4: Esquema horno industrial tipo cubilote.

Fuente: insertec-store.es

La empresa consume de 13 a 15 toneladas de combustible bimestralmente, es decir una media de 7 toneladas de carbón coque en un mes regular de producción. Este se compra en promedio a \$625 COP el kilogramo. A continuación se muestra una tabla que resume las compras de combustible del año 2019:

AÑO 2019						
MES	ENERO	MARZO	MAYO	JULIO	SEPTIEMBRE	NOVIEMBRE
Carbón coque (ton)	13,9	14,2	13,6	14,7	14,8	14,1
Costo (COP\$)	\$8.687.500	\$8.875.000	\$8.500.000	\$9.187.500	\$9.250.000	\$8.812.500

Tabla 1: Cantidad y precio de carbón coque consumido en 2019.

Fuente: Registros empresa, elaboración propia.

En el año 2019 la compañía adquirió cerca de 85,3 toneladas de combustible, carbón coque, las cuales costaron \$53'312.500 COP.

2.4 Determinación de fuentes de energía residual

Parte fundamental del presente proyecto consiste en la identificación de las fuentes residuales de energía del proceso de producción de la compañía, ya que es allí donde pueden haber posibilidades de reconversión energética por recuperación de calor residual.

El horno industrial tipo cubilote, equipo utilizado para llevar a cabo el proceso de fundición es donde se presenta la principal fuente de energía residual. Esta energía no aprovechada está contenida mayormente en los gases de escape del horno producto de la combustión, ya que estos antes de pasar por el sistema de filtración de emisiones atmosféricas alcanzan una temperatura de hasta 360 °C, este calor presente en los gases es básicamente energía térmica la cual se puede aprovechar.

A continuación se presentan las características generales de funcionamiento del horno industrial:

Tipo	Proceso en el que se emplea	Capacidad nominal	Tiempo de operación promedio	Consumo de combustible nominal
Horno Cubilote	Fundición de hierro gris	2 Ton/h	6h/día 3días/semana	400 - 500 kg/h

Tabla 2: Características generales de operación horno industrial tipo cubilote.

Fuente: Registros empresa.

En este equipo los gases de combustión son emitidos a la atmósfera por medio de una chimenea cuyo punto más alto se encuentra a 26 metros del suelo. El sistema de tratamiento de emisiones genera costos adicionales en conceptos de mantenimiento, consumo de agua y consumo de energía eléctrica. La implementación de este sistema tiene como objetivo estar del corriente con lo establecido en la normativa nacional vigente, Resolución 909 de 2008 expedida por el Ministerio de Ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial, la cual es de obligatorio cumplimiento para la empresa [13].

Por otra parte, también es necesario conocer algunos parámetros fisicoquímicos de los gases de combustión expulsados por la chimenea para así poder tener una visión más clara sobre las características de la corriente de energía residual a fin de escoger adecuadamente qué tipo de reconversión energética puede tener lugar en la empresa.

2.4.1 Características físicas de los gases de combustión

Fuente	Horno Cubilote		
	M1	M2	M3
Fecha de muestreo	22/03/19	23/03/19	24/03/19
Oxígeno en los gases a la salida (% en volumen)	15,8	17	15,6
Humedad en los gases a la salida (% en volumen)	4,99	3,61	4,19
Flujo volumétrico de los gases de salida (m ³ /min)	24	24	24
Velocidad de los gases de salida (m/s)	10,64	11,08	11,1
Temperatura de los gases de salida (°C)	337,63	356,75	362,01
Presión de los gases de salida (mm Hg)	559,62	559,62	559,62

Tabla 3: Parámetros físicos de los gases de combustión del horno cubilote.

Fuente: Registros empresa.

Según las tres (3) mediciones realizadas (M1, M2 Y M3), los gases de combustión del horno industrial tipo cubilote salen a una temperatura promedio de 352,13°C y con un flujo volumétrico de 24 m³/min, datos claves para el presente trabajo; por otra parte la presión de salida de los gases es constante, de unos 559,62 mm Hg, su porcentaje de oxígeno y humedad son bajos como es de esperarse y estos salen a una velocidad promedio de 10,94 m/s

2.4.2 Composición química de los gases de combustión

Fuente	Oxígeno (%)	Dióxido de carbono (%)	Monóxido de carbono (%)	Nitrógeno y otros gases (%)
Cubilote	16,13	4,07	0,0	79,8

Tabla 4: Parámetros químicos de los gases de combustión del horno cubilote.

Fuente: Registros empresa.

Todos los datos anteriormente presentados fueron las conclusiones de un muestreo isocinético realizado por la empresa COMNAMBIENTE S.A.S. la cual fue contratada en 2019 por la empresa Mecanizamos FM S.A.S. para verificar el cumplimiento de la normativa nacional vigente e igualmente establecer un diagnóstico preciso del funcionamiento y estado actual del horno industrial tipo cubilote. Este muestreo se compiló en un estudio de emisiones atmosféricas el cual reposa en los archivos de la compañía.

3. PROPUESTA Y POSIBILIDADES DE RECONVERSIÓN ENERGÉTICA

Precalentamiento del aire de alimentación del horno industrial

En la empresa Mecanizamos FM S.A.S. el horno industrial tipo cubilote empleado para el proceso de producción alcanza una temperatura máxima de unos 1500°C; este genera unos gases de combustión que salen en promedio a unos 352°C por la chimenea. Por lo tanto, si se centran esfuerzos en recuperar esa energía residual esto puede traducirse en ahorros importantes en el consumo de combustible, lo cual se traduce básicamente en disminución de costos fijos y disminución de huella de carbono. Lo cual trae consigo reconocimiento a nivel empresarial, mayor competitividad en el subsector industrial de la empresa y posibles incentivos tributarios por implementar sistemas que incrementen la EE de los procesos.

El precalentamiento de aire usado para la combustión es bastante común en sistemas que utilizan combustible sólido (carbón, biomasa, madera, etc.) para sus procesos, ya que al usar aire a una mayor temperatura se produce una combustión más completa [16], y si a esto se le suma que para calentar el aire se usan los gases de combustión producto del mismo proceso se estaría contribuyendo notablemente a la mejora de la EE de la empresa en general y en la disminución de los impactos negativos al ambiente [17].

La propuesta inicialmente consiste en la instalación de un intercambiador de calor, el cual es un dispositivo usado, entre otras cosas, para transferir energía térmica a través de convección y conducción entre dos o más fluidos. Este equipo tendrá la función de precalentar el aire de alimentación del horno cubilote con la energía presente en los gases de combustión. Recuperando así energía térmica que actualmente se está perdiendo por la chimenea del horno, reintegrándola al proceso, lo cual constituye un aprovechamiento al máximo del combustible utilizado y significa una disminución en el consumo del mismo.

El equipo que más se adecúa a las necesidades de la empresa es un intercambiador de calor de tipo recuperativo, este es un tipo de intercambiador de calor que posee rutas de flujo separadas y el calor se transfiere a través de las paredes de separación. Este tipo de recuperadores a menudo se utilizan en ingeniería de energía y en la industria metalúrgica, para aumentar la eficiencia

general de los ciclos termodinámicos, ya que transfiere parte la energía presente en los gases de escape al aire de alimentación del proceso, precalentando así este fluido antes de ingresar a la cámara de combustión. [18]

Según los datos del fabricante y en función de las jornadas de mantenimiento preventivo, la calidad en los fluidos de trabajo, los tiempos de operación y las actividades de limpieza; este tipo de equipos posee un vida útil que varía en un rango de 10 a 15 años. [19]

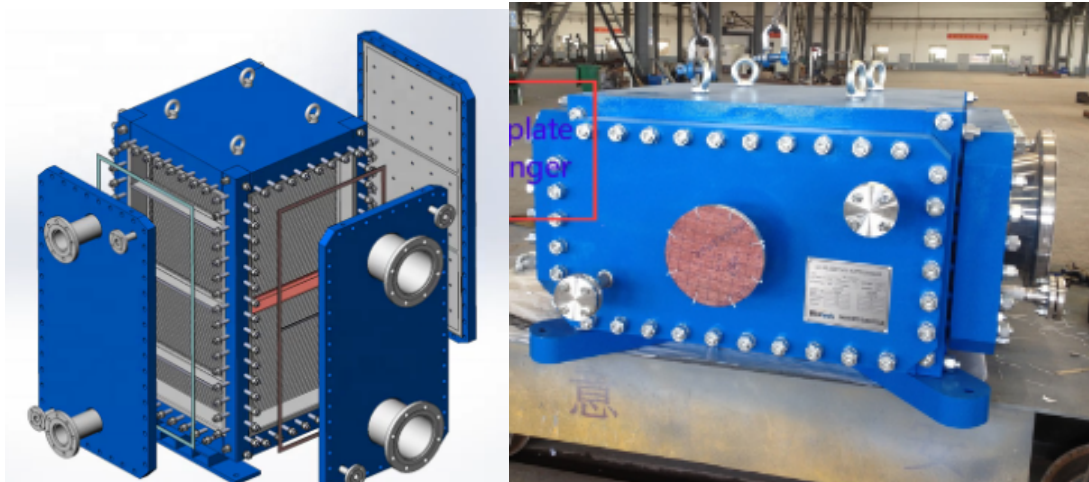


Imagen 3: Intercambiador de calor tipo recuperativo.

Fuente: Alibaba.com

3.1.1 Análisis del intercambiador

El presente análisis se basa en la primera ley de la termodinámica, la cual se resume en la siguiente ecuación

$$Q - W = \Delta E$$

Donde:

Q = Calor que ingresa al sistema

W = Trabajo que sale del sistema

ΔE = Cambio de energía

Dado que el intercambiador de calor es un equipo que aprovecha los fenómenos combinados de convección y conducción para realizar la transferencia de energía, no necesita hacer uso del trabajo mecánico por lo tanto la expresión se reduce a:

$$Q = \Delta E$$

Balance de energía

Para realizar el respectivo balance de materia a un nivel teórico se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones en primera instancia:

- Se considerará que el sistema es adiabático, es decir que no intercambia calor con el ambiente.
- Se asume también que no se producen cambios físicos ni químicos en los fluidos de trabajo: gases de combustión y aire.

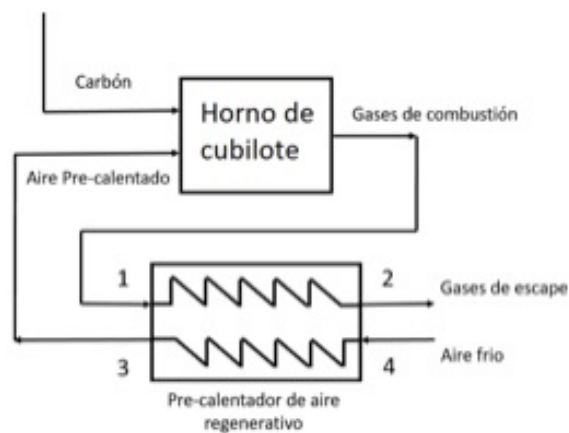


Imagen 4: Diagrama del proceso.

Fuente: Elaboración propia

Los números 1, 2, 3 y 4 en el diagrama del proceso (imagen 4) hacen referencia a las diferentes temperaturas que se van a manejar en el sistema. Estas condiciones iniciales de entrada de los flujos de trabajo son:

- $T_1 = 352.13 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Temperatura salida horno)
- $T_2 = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Suponiendo un aprovechamiento total, se realiza de esta forma para calcular la EE real del equipo más adelante)
- $T_4 = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Aire tomado a condiciones estándar)
- $Cp_g = 1.15 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ (calor específico de los gases de combustión) [20]
- $Cp_{a1} = 1.056 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ (Calor específico del aire a T_1) [20]

- $Cp_{a4} = 1.007 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (Calor específico del aire a T_4) [20]

Cp_{a1} y Cp_{a4} se interpolaron según tablas de temperatura y presión. [20]

Análisis ideal

Este análisis ideal se realizará con el supuesto de una eficiencia del 100% en el intercambiador, es decir que toda la energía presente en los gases de escape se transfieran en su totalidad al aire de alimentación del horno cubilote; esto con el fin de posteriormente calcular la eficiencia real del equipo, es por eso que T_2 se asume como 25°C en este caso.

energía de entrada = energía de salida

$$Cp_g * T_1 + Cp_{a4} * T_4 = Cp_g * T_2 + Cp_{a1} * T_3$$

$$T_3 = \frac{Cp_g * (T_1 - T_2) + Cp_{a4} * T_4}{Cp_{a1}}$$

$$T_3 = \frac{1,15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * (625,28 \text{ } ^\circ\text{K} - 283,15 \text{ } ^\circ\text{K}) + 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 298,15 \text{ } ^\circ\text{K}}{1,056 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}}$$

$$T_3 = 640,56 \text{ } ^\circ\text{K} \text{ (Temp. ideal)}$$

$$T_3 = 367,41 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (Temp. ideal)}$$

Suponiendo una eficiencia del 100% en el intercambiador, el aire de alimentación al horno cubilote alcanzaría una temperatura de 367,41 °C.

Análisis real

En este análisis se realizará con el fin de conocer cuál sería la eficiencia real del intercambiador de calor, como también la cantidad de energía en kW que los gases de escape le transferirían al aire de combustión. En esta ocasión se tomará T_2 como 80 °C, ya que este es un valor aproximado que indica a que temperatura

salen los gases de combustión luego de transferirle energía y así calentar el aire de alimentación al horno cubilote; es el fabricante del equipo quien proporciona este dato el cual se especifica en la ficha técnica del mismo.

energía de entrada = energía de salida

$$Cp_g * T_1 + Cp_{a4} * T_4 = Cp_g * T_2 + Cp_{a1} * T_3$$

$$T_3 = \frac{Cp_g * (T_1 - T_2) + Cp_{a4} * T_4}{Cp_{a1}}$$

$$T_3 = \frac{1,15 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K} * (625,28 \text{ } ^\circ K - 353,15 \text{ } ^\circ K) + 1,007 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K} * 298,15 \text{ } ^\circ K}{1,056 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}}$$

$$T_3 = 580,67 \text{ } ^\circ K \text{ (Temp. ideal)}$$

$$T_3 = 307,52 \text{ } ^\circ C \text{ (Temp. ideal)}$$

Bajo este análisis el aire de alimentación al horno cubilote alcanzaría una temperatura de 307,52 °C. Un beneficio importante que impacta directamente en el rendimiento general del proceso.

Posteriormente se procede a calcular los flujos de calor en los fluidos de trabajo.

➤ Flujo de calor real de los gases de combustión:

$$Q' = m'_g * CP_g * (T_1 - T_2)$$

Donde:

Q' = Cantidad de energía en kW

m'_g = Flujo másico de los gases de combustión en kg/s

CP_g = Calor específico de los gases de combustión en kJ/kg*K; Interpolado con tablas del aire. [20]

T_1 = Temperatura de los gases de comb. antes de pasar por el intercambiador.

T_2 = Temperatura de los gases de comb. después de pasar por el intercambiador.

$$Q' = 0,745 \frac{kg}{s} * 1,15 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ K} * (625,28 \text{ } ^\circ K - 353,15 \text{ } ^\circ K)$$

$$Q' = 233,211 \text{ kW}$$

Este valor denota la cantidad de energía que los gases de combustión son capaces de transferir al otro fluido de trabajo, en este caso, el aire de alimentación al horno cubilote. Por lo que se puede decir que los gases de combustión están en la capacidad de transferir hasta 233,211 kW.

➤ **Flujo de calor real del aire de alimentación:**

$$Q' = m'_a * Cp_{a3} * (T_3 - T_4)$$

Donde:

Q' = Cantidad de energía en kW

m'_a = Flujo másico del aire de alimentación en kg/s

Cp_{a3} = Calor específico del aire de alimentación a T_3 en kJ/kg*K; Interpolado con tablas del aire. [20]

T_3 = Temperatura del aire después de pasar por el intercambiador.

T_4 = Temperatura del aire antes de pasar por el intercambiador.

$$Q' = 0,672 \frac{kg}{s} * 1,054 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ K} * (580,67 \text{ } ^\circ K - 298,15 \text{ } ^\circ K)$$

$$Q' = 200,112 \text{ kW}$$

Este valor es de suma importancia para el análisis del sistema propuesto, ya que denota la cantidad de energía que el aire de alimentación al horno cubilote recibe de los gases de combustión; es decir esos 200,112 kW constituyen la cantidad de energía que se recupera del proceso, energía que está contenida en los gases de combustión la cual actualmente la empresa está desperdiciando ya que se emite a la atmósfera.

Eficiencia energética del intercambiador

$$e = \frac{\text{Flujo de calor real del aire de alimentación}}{\text{Flujo de calor real de los gases de combustión}} * 100\%$$

$$e = \frac{200,112 \text{ kW}}{233,211 \text{ kW}} * 100\%$$

$$e = 85,8\%$$

La eficiencia energética del intercambiador es bastante alta, esto debido a los supuestos que se hicieron para realizar los calculos.

3.1.2 Análisis Económico

Flujo de calor aire real:

$$Q' = 200,112 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Poder calirifico del carbòn coque:

$$CP_{\text{coque}} = 35000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Flujo másico equivalente:

$$\text{Flujo másico coque equivalente} = \frac{Q'}{CP_{\text{coque}}}$$

$$\text{Flujo másico coque equivalente} = \frac{200,112 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{35000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$\text{Flujo másico coque equivalente} = 0,00571 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Este valor relaciona la cantidad de energía que el aire de alimentación recibe de los gases de combustión producto del proceso que se lleva a cabo en el intercambiador de calor, con la capacidad calorífica del carbón coque, combustible empleado en la empresa.

Se calcula para determinar cuánto combustible se ahorra por cada segundo de operación. Teniendo en cuenta las horas de trabajo y los días por semana de operación del horno industrial tipo cubilote, la empresa Mecanizamos FM S.A.S. tendría una reducción en cuanto al consumo de carbón de aproximadamente 1481,974 kg de carbón coque al mes, lo cual se traduce en un ahorro de 926.233,75 COP/mes.

Tiempo de recuperación de la inversión del intercambiador de calor en función de la energía recuperada:

Costo del coque 625 COP/kg

$$\text{Flujo económico de entrada} = 0,00571 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 625 \frac{\text{COP}}{\text{kg}}$$

$$\text{Flujo económico de entrada} = 3,5687 \frac{\text{COP}}{\text{s}}$$

Costo del equipo 5.000 USD o 17'973.000,00 COP a tasa de cambio actual.

$$\text{Tiempo} = \frac{\text{Costo el equipo (COP)}}{\text{Flujo economico entrada.}}$$

$$\text{Tiempo} = \frac{17'973.000,00 \text{ COP}}{3,5687 \frac{\text{COP}}{\text{s}}}$$

$$\text{Tiempo} = 5036287,72 \text{ s}$$

$$\text{Tiempo} = 1398,97 \text{ horas de trabajo}$$

Esto quiere decir que la inversión del intercambiador de calor se recuperaría en tiempo aproximado de 1398,97 horas de trabajo del horno insdustrial.

Dado que la empresa Mecanizamos Florián Marín S.A.S. emplea su horno industrial tipo cubilote en periodos de 6 horas al día y de 3 días por semana, esta inversión retornará a la compañía en 19,42 meses aproximadamente.

Este análisis se realiza en función de la energía recuperada, es decir energía que la compañía no tendrá que adquirir de terceros tal y como sucede actualmente.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- ✓ Con la implementación del intercambiador de calor tipo recuperador la compañía Mecanizamos Florián Marín SAS reduciría cerca del 20,17% de su consumo de carbón coque al mes.
- ✓ Con la implementación del sistema propuesta la empresa estaría ahorrando unos \$11'114.805 COP al año en compra de carbón coque.
- ✓ La recuperación de la inversión en caso de implementar el sistema de recuperación de energía, se daría aproximadamente en un año y medio después de la implementación.
- ✓ La inversión del recuperador de calor se amortizaría gracias a la cantidad de energía recuperada, ya que esta se estaría transformando en calor en la misma empresa, por lo que no se tendría que comprar a terceros.
- ✓ El proyecto resulta viable ya que la vida útil del equipo es de 10 a 15 años, por lo que podrán disminuir costos netos de producción por varios años después de recuperada la inversión del intercambiador de calor, que es de 19,42 meses o bien 1,62 años aproximadamente según los cálculos de recuperación de la inversión.
- ✓ Según la Ley 1715 de 2014, expedida por el Congreso Nacional de la República de Colombia, en su Artículo 11 establece que *“Como fomento a la investigación, desarrollo e inversión en el ámbito de producción y utilización de Fuentes no Convencionales de Energía (FNCE) y la gestión eficiente e la energía, los obligados a declarar renta que realicen inversiones en este sentido tendrán derecho a reducir anualmente de su renta y durante los 5 años posteriores a la inversión el 50% del valor total de la inversión realizada”*. Esto quiere decir que la empresa Mecanizamos FM S.A.S. podría reducir hasta 8'986.500,00 COP de su declaración de renta anual durante los 5 años posteriores a la inversión, los cuales equivalen al 50% de los 17'973.000,00 COP, valor total del intercambiador de calor.

4.2 Recomendaciones

- ✓ Antes de cualquier tipo de intervención en la planta se debe verificar que se sigan adoptando buenas prácticas de operación tal y como sucede hasta el momento.
- ✓ Los equipos a emplear dependen mucho de la composición de los gases de escape, por ello es necesario que se continúen realizando estudios de emisiones atmosféricas, como el muestreo isocinético realizado por la empresa COMNAMBIENTE S.A.S. en 2019 donde se establecieron claramente las propiedades físicas y químicas de los gases de combustión.
- ✓ Es necesario realizar una capacitación al personal de la planta en caso de ser implementado el sistema de recuperación de calor de gases de combustión en cuanto al correcto manejo, operación y mantenimiento del intercambiador de calor.
- ✓ El mantenimiento del equipo sugerido, el intercambiador de calor se debe realizar mediante cronograma y a manera de precaución y rutina tal y como lo indique el fabricante en su ficha técnica.
- ✓ Se debe mantener el combustible en un lugar cerrado evitando a toda costa presencia de humedad ya que un combustible húmedo dificulta el proceso de combustión.
- ✓ Disminuir el tamaño de partícula del combustible eleva el rendimiento de la combustión al igual que el precalentamiento del aire.
- ✓ Seguir estrictamente los programas de mantenimiento preventivo y revisar que no haya presencia de fugas en el sistema.
- ✓ Muy importante evitar taponamientos en la zona de carga, ya que esto desmejora la eficiencia energética del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

[1] J. R. Wilson; G. Burgh; J. Wiley & Sons Inc. "Energizing Our Future; Rational Choices for the 21st Century," 2008.

[2] F. J. Ugalde Barrales, "Aprovechamiento de calor de gases de combustión en una planta acerera," 2018.

[3] Departamento Nacional de Planeación (DNP). "Energy Demand Situation in Colombia," 2017

[4] Banco de Desarrollo de América Latina – CAF. "Eficiencia energética en Colombia: Identificación de oportunidades," 2016

[5] Ley 1215 de 2008. Por la cual se adoptan medidas en materia de generación de energía eléctrica. Diario Oficial 47052 de Colombia. Julio 16 de 2008.

[6] Resolución 085 de 1996. Cogenerador conectado al SIN. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, Comisión Reguladora de Energía y Gas, CREG. 1996.

[7] HART-RE. "Capacidad instalada de autogeneración y cogeneración en sector de industria, petróleo, comercio y público del País,". Informe presentado por el consorcio HART-RE a la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, diciembre 22 de 2014.

[8] M. I. Sosa and A. Fushimi, "La cogeneración en el contexto de las tecnologías de conversión energética del futuro," *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente*, vol. 4, 2000.

[9] A. C. Escudero & S. Botero, "Estado del arte y una propuesta integradora para el estudio de la brecha energética en la implementación de la cogeneración en el sector industrial." *Energética*, (42), pp. 63-72, 2009.

[10] M. Marichal Abiuso, "Cogeneración en el sector industrial: un análisis sobre el estado de situación actual y las perspectivas de desarrollo en el marco de la política energético 2005-2030," 2017

[11] IEA-International Energy Agency. "Combined heat and power. Evaluating the benefit of greater global investment," París: OECD-IEA. 2008

[12] E. Guevara, "Fabricación en fundición gris del tambor de freno para un automóvil ensamblado en el ecuador," 2015

[13] Resolución 909 de 2008. Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. Ministerio de Ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial, 2008.

[14] Resolución 030 de 2018. Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional. Comisión Reguladora de Energía y Gas, CREG. 2018

[15] A. Amell, H. Copete and F. Cadavid, "Desarrollo y evaluación de un sistema de combustión auto regenerativo y radiante para procesos de alta temperatura en PYMES," *Dyna*, vol. 74, (151), pp. 61-69, 2007.

[16] R. C. C. Huallpachoque, "Ahorro de energía primaria mediante precalentamiento del aire y agua en una unidad de generación de vapor," *INGnosis Revista De Investigación Científica*, vol. 3, (2), pp. 365-375, 2017.

[17] J. C. Medina López and J. H. Taco Tercero, "*Diseño Y Construcción De Un Horno De Cubilote Con Aire Precalentado Para Fines Didácticos*," 2012.

[18] C. F. López Ruano and L. A. Trejo Flores, "*Diseño Y Construcción De Un Intercambiador De Calor Directo Para Horno Cubilote*," 2013.

[19] O. A. Jaramillo, "Intercambiadores de calor," *Centro De Investigación En Energía., México DF*, 2007.

[20] Y. A. Cengel et al, Termodinámica. 2003.

[21] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). "PLAN ENERGÉTICO NACIONAL 2020- 2050," 2019.