



**Facultad de Ingeniería y Computación**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Análisis bibliográfico de los residuos con alto poder calorífico  
como alternativa de sustitución a los combustibles fósiles en la  
industria**

Trabajo de Investigación presentado por  
los alumnos de la Escuela Profesional de  
Ingeniería Industrial:

**ANDREA NICOLLE DIAZ**

**AMPUERO**

**CHRISTIAN ARTURO ZEVALLOS**

**PONCE**

Para optar por el grado académico de  
Bachiller en Ingeniería Industrial.

**Asesor:** Mg. Felipe Fabian Ramos Velasquez

**Arequipa, 2020**

## **Título**

Análisis bibliográfico de los residuos con alto poder calorífico como alternativa de sustitución a los combustibles fósiles en la industria

Bibliographic analysis of waste with high calorific power as a substitute for fossil fuels in the industry

## **Dedicatoria**

Dedicamos este trabajo a nuestros padres por las oportunidades que nos brindan, por ser nuestra fuerza y ejemplo. A nuestros hermanos por acompañarnos y alegrarnos siempre. A nuestros abuelos por su amor incondicional.

## **Agradecimientos**

Agradecemos a Dios por ser nuestra guía. A nuestras familias por su apoyo constante. A nuestros maestros por los conocimientos impartidos durante nuestra formación profesional.

## Resumen y Palabras clave

Los combustibles fósiles derivados de residuos sólidos (CDR) son hoy en día un recurso eficiente para diferentes industrias. Al ser elementos limitados, cada vez más escasos y con un mayor costo se requiere buscar una nueva alternativa de generación de energía que logre sustituir y desempeñar la misma función que los mismos. El mundo sigue atado principalmente al carbón y al petróleo, explotándolos de sobremanera y no percibiendo las consecuencias que se podrían dar en un futuro no muy lejano.

Los residuos sólidos son una excelente alternativa de solución para el problema que se presenta, poseen valoración energética la cual puede ser explotada mediante una gestión adecuada, analizando el poder calorífico. Entre las opciones de tratamiento de residuos se ve al reciclaje y reutilización como también procedimientos de incineración, gasificación, pirólisis, termólisis o coprocesamiento los cuales son empleados en diversas industrias como una opción de aprovechamiento de energía.

Existen actualmente varios sectores en diversas partes del mundo que emplean estos tratamientos como alternativa de sustitución de combustibles fósiles, dando excelentes resultados que se pueden visualizar en el aspecto ambiental por la disminución de generación de CO<sub>2</sub>, y en lo económico, gracias al margen de ahorro en la comparación de compra de los respectivos insumos. Industrias como la cementera en sus hornos industriales de clinker, industrias de cal y yeso, el sector eléctrico e incluso la industria siderúrgica vienen aprovechando al máximo el poder calorífico que diferentes residuos sólidos proporcionan para la ejecución de sus procesos.

Palabras clave: Combustibles fósiles, Residuos sólidos, Combustibles derivados de residuos (CDR), poder calorífico.

## **Abstract & Keywords**

Refuse derived fuel (RDF) are today an efficient resource for different industries. Being limited elements, increasingly scarce and with a higher cost, it is necessary to look for a new energy generation alternative that manages to replace and perform the same function as them. The world continues to be tied mainly to coal and oil, exploiting them excessively and not perceiving the consequences that could occur in the not too distant future.

Solid waste is an excellent alternative solution to the problem that arises, they have an energy rating that can be exploited through proper management, analyzing the calorific value. Waste treatment options include recycling and reuse as well as incineration, gasification, pyrolysis, thermolysis or co-processing procedures which are used in various industries as an option for energy use.

There are currently several sectors in different parts of the world that use these treatments as an alternative to substituting fossil fuels, giving excellent results that can be seen in the environmental aspect due to the decrease in CO<sub>2</sub> generation, and economically, thanks to the savings margin. in the purchase comparison of the respective supplies. Industries such as the cement factory in its industrial clinker kilns, lime and gypsum industries, the electricity sector and even the steel industry have been taking full advantage of the calorific value that different solid wastes provide for the execution of their processes.

**Keywords:** Fossil Fuels, solid waste, Refuse derived fuel (RDF), calorific value.

# Índice General

<b>Título</b> .....	2
<b>Dedicatoria</b> .....	3
<b>Agradecimientos</b> .....	4
<b>Resumen y Palabras clave</b> .....	5
<b>Abstract &amp; Keywords</b> .....	6
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	11
<b>CAPITULO 1: PLANTEAMIENTO GENERAL</b> .....	12
<b>1.1 Planteamiento del Problema</b> .....	12
1.1.1. Descripción del Problema .....	12
1.1.2. Formulación del problema .....	14
1.1.3. Sistematización del problema .....	14
1.2 Objetivos de la investigación.....	15
1.2.1. Objetivo General .....	15
1.2.2. Objetivos Específicos .....	15
1.3. Justificación .....	15
1.3.1 Justificación teórica: .....	15
1.4 Delimitación .....	16
1.4.3. Delimitación espacial.....	16
1.4.2. Delimitación temporal: .....	16
<b>CAPÍTULO 2: ASPECTOS METODOLÓGICOS</b> .....	17
2.1 Tipo de estudio: .....	17
2.2 Método de investigación: .....	17
2.3 Fuentes para recolección de información: .....	17
2.4 Tratamiento de la información: .....	18
<b>CAPÍTULO 3: MARCO DE REFERENCIA</b> .....	19

<b>3.1 Estado del Arte:</b> .....	19
<b>3.2. Marco teórico – conceptual:</b> .....	24
3.2.1. Combustibles Fósiles .....	24
3.2.1.1. Petróleo .....	24
3.2.1.2. Carbón.....	26
3.2.1.3. Gas Natural .....	28
3.2.2. Residuos Sólidos.....	29
3.2.3. Normativa .....	30
3.2.4. Gestión de Residuos Sólidos.....	34
3.2.5. Combustibles Derivados de Residuos (CDR).....	36
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b> .....	41
<b>4.1 Resultados</b> .....	41
<b>4.2 Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	43
4.2.1. Conclusión del objetivo general .....	43
4.2.2. Conclusiones de los objetivos específicos .....	43
4.2.3. Recomendaciones .....	45
<b>Bibliografía</b> .....	46

## Índice de tablas

Tabla 1 Poder calorífico teórico de los componentes del RDF Refuse Derived Fuels potencial elaborado a partir de los RSU de la Provincia de Guantáná .....	19
Tabla 2 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del proceso productivo.....	20
Tabla 3: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero utilizando Combustibles derivados de residuos en reemplazo del carbón mineral.....	20
Tabla 4 Existencias actuales de petróleo.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 5 LMP para emisiones atmosféricas de plantas industriales de fabricación de cemento y/o cal .....	34
Tabla 6 Influencias de la separación previa de reciclables sobre la incineración.....	39

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total).....	13
Ilustración 2: Panorama del flujo de materiales de los RSU y sus diferentes opciones de utilización y tratamiento.....	35
Ilustración 3 El principio de la Economía Circular El papel de las tecnologías de aprovechamiento energético de residuos discutidas en esta guía se indica en los recuadros .....	36
Ilustración 4 Consumo de carbón y producción de coque, arrabio y acero (2010)....	<b>¡Error!</b>

**Marcador no definido.**

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación desarrolla una revisión bibliográfica de la industria y los combustibles fósiles que emplean, dirigiéndonos a los sectores que requieren grandes cantidades de energía siendo identificadas como industrias pesadas. Además, observamos el impacto que el carbón, petróleo y el gas tienen hacia el ambiente, así como también se describe el análisis de los residuos sólidos, su gestión, el poder calorífico y la caracterización de los mismos. De esta manera se sustentan alternativas de reemplazo de combustibles por una opción menos dañina para el ambiente y por ende para la población.

En el capítulo uno se realiza una investigación sobre el problema central de los combustibles fósiles, y por qué deberíamos reemplazarlos, llegando a la formulación del problema donde se plantea ¿De qué manera los residuos sólidos con alto poder calorífico pueden sustituir el empleo de los combustibles fósiles en la industria?, el cual sería el propósito del objetivo general de la investigación.

En el capítulo dos se hace referencia al tipo de estudio, así como el método de investigación el cual fue exploratoria, no experimental, además en las fuentes consultadas se analizaron investigaciones y por último el tratamiento de la información se manifestó en una búsqueda virtual basándonos en artículos de investigación, libros, e incluso herramientas visuales.

En el capítulo tres se desarrolla el estado del arte en el cual se analizó diferentes investigaciones sobre el reemplazo de los combustibles fósiles en las industrias, otro punto del capítulo es el marco teórico, donde se describen y se presentan los conceptos más importantes que abordan el tema de investigación, en nuestro caso asociados con los combustibles fósiles, residuos sólidos, la valoración energética de los mismos y las normas que regulan a los tratamientos de residuos. Una revisión bibliográfica de conceptos e investigaciones con el fin de responder las preguntas formuladas en la sistematización del problema.

Para finalizar, en el capítulo cuatro se hace una derivación de la información recolectada donde llegamos a diferentes conclusiones, donde respondemos si realmente es posible sustituir los combustibles fósiles por residuos sólidos. Además, se llega a resultados y recomendaciones a partir de la revisión hecha a lo largo de la investigación.

## **CAPITULO 1: PLANTEAMIENTO GENERAL**

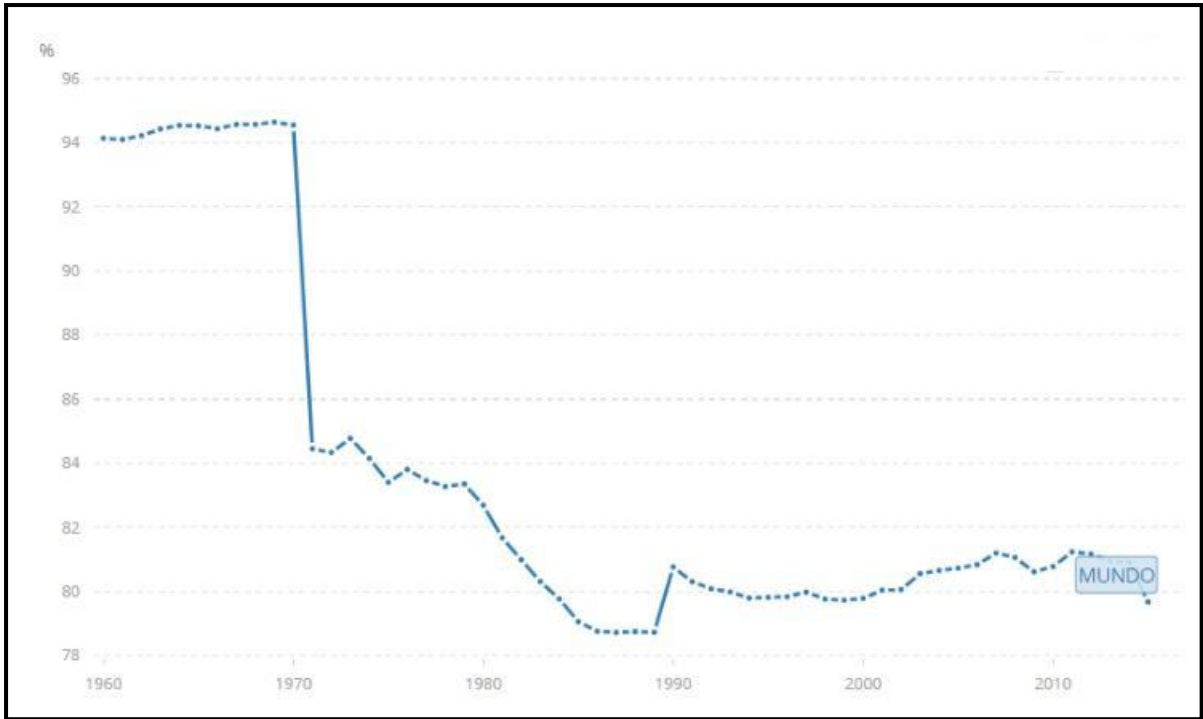
### **1.1 Planteamiento del Problema**

#### 1.1.1. Descripción del Problema

Desde la revolución industrial hasta la actualidad, el mundo, la economía y por ende el estilo de vida, se ha visto influenciada en gran porcentaje por los combustibles fósiles. Tal fue el impacto, que décadas atrás nuestro sistema dependía básicamente del petróleo, sin embargo, todos los combustibles fósiles son limitados y, sobre todo, no pueden ser renovados.

Por otro lado, se sabe que la contaminación y el calentamiento global son consecuencia de la emisión de CO<sub>2</sub>, producto del consumo de energía. Reyes (1999) nos dice que el carbón, el petróleo y el gas natural son las fuentes que, en su combustión suministran alrededor del 88 % de la energía consumida por el mundo para satisfacer los requerimientos de una sociedad en pro de un mejor nivel de vida.

Además, la contaminación y la situación finita de los combustibles fósiles, no es el único problema, su explotación a gran escala nos pone en un escenario a futuro muy peligroso. El siguiente gráfico refleja la utilización de los combustibles, el consumo de energía dio un giro teniendo como soporte los combustibles fósiles. Un impacto tan grande, que desde el año 1960 no se ha parado de utilizar éstos para producir siempre un promedio de más del 80 % de la totalidad de energía que se utiliza en el mundo. Esto significa, que este recurso está siendo más que explotado, si bien los últimos años redujo su porcentaje considerablemente por las diferentes alternativas para la producción de energía, su utilización sigue siendo masiva.



*Ilustración 1* Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total)  
 Fuente: Agencia Internacional de la Energía (Estadísticas de la AIE) 2014

Asimismo, se sabe que los residuos sólidos son generados diariamente no sólo por las personas, sino también, por miles de industrias alrededor del mundo, originando un impacto negativo hacia el medio ambiente por la contaminación emitida. Según Hoornweg (2012) nos comenta que debido a la mayor demanda vista de bienes y servicios, se calcula que para el año 2025 existirá una producción global de 2200 millones de toneladas al año de residuos sólidos urbanos.

Teniendo en cuenta la severidad del problema, las industrias, hoy en día se ven obligadas a tomar en cuenta diversas normativas que se le atribuyen sobre la generación del CO<sub>2</sub>, estas legislaciones tienen la finalidad de manejar una línea de responsabilidad medioambiental y así tener un equilibrio en el ambiente. Es por eso que las organizaciones deben buscar operar con la menor cantidad de contaminación, siendo los combustibles fósiles las principales fuentes de emisión de sustancias tóxicas.

Considerando el aumento de población, por ende, la generación de residuos, donde muchos de ellos no son dispuestos a tratamientos previos, ni mecanismos de disposición final adecuada, es necesario la búsqueda de tecnologías que permitan la

eliminación total de los mismos de una manera eficiente, económicamente rentable y ambientalmente sostenible.

Según (FICEM, 2017 ) aclara que realmente no existe una tabla estándar de residuos sólidos para ser reutilizados como aprovechamiento energético, sino que muchas veces depende realmente de la disposición de residuos sólidos que tenga el lugar donde se está realizando el estudio sobre la gestión de residuos con el fin de aprovecharlos energéticamente. Es decir, en Perú no se encontrará la misma cantidad de llantas que en Estados Unidos, entonces es necesario hacer un estudio local sobre éstos para identificar de cuales se dispone y posteriormente hacer un estudio energético o un análisis de su poder calorífico para que el reemplazo por combustibles sea mucho más eficiente.

Conociendo la gravedad de la situación, es necesario tomar decisiones a pequeña y gran escala por lo que ésta investigación buscará identificar alternativas de gestión de residuos con el fin de aprovecharlos como sustitución de combustibles fósiles, para que diferentes industrias tengan la iniciativa de no solo tener una disminución en sus gastos de combustibles fósiles sino también reducir las emisiones tóxicas que estos emiten, esto será posible mediante la implementación de combustibles derivados de diferentes residuos analizados.

#### 1.1.2. Formulación del problema

¿De qué manera los residuos con alto poder calorífico pueden sustituir el empleo de los combustibles fósiles en las industrias?

#### 1.1.3. Sistematización del problema

- a) ¿Cuál es la situación actual del consumo de combustibles fósiles en la industria?
- b) ¿Cuáles son los residuos sólidos con alto poder calorífico de origen industrial?
- c) ¿Qué normativas regulan las emisiones de CO<sub>2</sub> en la industria?
- d) ¿Cómo se maneja o se disponen los residuos sólidos con alto poder calorífico?
- e) ¿Qué industrias emplean combustibles fósiles?

- f) ¿Es viable que los residuos sólidos pueden reemplazar los combustibles fósiles?

## 1.2 Objetivos de la investigación

### 1.2.1. Objetivo General

Analizar la información existente sobre los residuos con alto poder calorífico que tengan la capacidad de sustituir diferentes combustibles fósiles en la industria

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- a. Conocer la situación actual sobre el uso de diferentes combustibles fósiles en la industria.
- b. Identificar los diferentes tipos de residuos con alto poder calorífico.
- c. Analizar la normativa que regula las emisiones de CO<sub>2</sub> en la industria.
- d. Recolectar información sobre el manejo o disposición de los residuos sólidos con alto poder calorífico.
- e. Identificar las diferentes industrias que emplean combustibles fósiles.
- f. Determinar la viabilidad de reemplazar los combustibles fósiles con los residuos sólidos de alto poder calorífico.

## 1.3. Justificación

### 1.3.1 Justificación teórica:

La presente investigación es importante porque puede llegar a ser una alternativa clave para industrias que utilicen combustibles fósiles. Siendo hoy en día de gran relevancia la reducción de la contaminación por los gases de efecto invernadero que estos emiten a la atmósfera. A la vez se redactará la importancia de una gestión de residuos sólidos, los cuales tienen la capacidad de sustituir a diversos combustibles fósiles, de esta manera no sólo se buscaría una disminución de la contaminación sino también ahorro al momento de la adquisición de combustibles.

Es importante expresar que existen estudios, análisis y pruebas donde se observa la utilización de ciertos residuos con alto poder calorífico para su combustión con excelentes resultados. A su vez, estas técnicas de reemplazo ya son utilizadas en diversas industrias cementeras en diferentes partes del mundo.

## 1.4 Delimitación

### 1.4.1. Delimitación temática:

La presente investigación realizará el estudio de los diferentes residuos sólidos con alto poder calorífico de origen industrial, con la finalidad de demostrar el aprovechamiento de estos como sustitución de los combustibles fósiles en la industria.

### 1.4.3. Delimitación espacial

La presente investigación se enfocará en la recolección de información de diferentes estudios de teorías analizadas y desarrolladas en la industria correspondiente a diversas partes del mundo.

### 1.4.2. Delimitación temporal:

La información recolectada estará en función de un horizonte temporal de 5 meses, desde marzo hasta julio.

## **CAPÍTULO 2: ASPECTOS METODOLÓGICOS**

### **2.1 Tipo de estudio:**

La presente investigación realiza un tipo de estudio de carácter exploratorio, pues se desarrolla una revisión bibliográfica para familiarizarnos con el tema, y así lograr capturar un conocimiento superficial tanto de diferentes residuos sólidos generados, como combustibles fósiles derivados y las industrias hasta la actualidad compatibles con técnicas de reemplazo de combustibles fósiles.

Siendo esta información recolectada una importante base para investigaciones que a futuro requieran mayor indagación sobre el tema.

### **2.2 Método de investigación:**

El siguiente trabajo desarrolla un método de investigación no experimental, exploratorio debido a que se analizan los acontecimientos, la situación o hechos ya existentes.

#### **2.2.1. Según el tipo de información**

La investigación es de tipo cualitativo ya que el objetivo es el análisis de diversos casos, hechos específicos. Buscando describir los avances o situación en que se encuentra el tema escogido y así ver que industrias aplican, ya sea de manera óptima o no, los combustibles derivados de residuos.

#### **2.2.2. Según el tipo de reflexión**

Se utiliza un método inductivo debido a que se llegaron a diversas conclusiones las cuales son resultado de hechos válidos, hallazgos y análisis. Estas conclusiones pueden servir de soporte en industrias cementeras, siderúrgicas, eléctricas que busquen alternativas de sustitución de combustibles fósiles empleados en su campo.

### **2.3 Fuentes para recolección de información:**

Para obtener la información recolectada se recurrió a un análisis de diversas fuentes secundarias alusivas al tema con el fin de conocer los conceptos claves para el desenlace de la investigación, así como también los antecedentes.

Principalmente el contenido captado fue encontrado en papers, revistas, artículos y trabajos de investigación, los cuales fueron encontrados en bases de datos y

bibliotecas electrónicas como Google Académico, SciELO; así como también se recurrió a fuentes del gobierno para conocer y analizar leyes y Decretos Supremos establecidos con respecto a la gestión de residuos sólidos y el Límite Máximo Permisible de contaminación en las industrias de nuestro país. La recolección de información fue realizada utilizando palabras clave como “combustibles fósiles, residuos sólidos, poder calorífico, combustibles derivados de residuos”, siendo uno de los filtros para la selección de los artículos la antigüedad de los mismos.

Se realizó una síntesis que enlazan las ideas de diferentes autores, para así tener una mejor descripción de los conceptos del tema de investigación. Los resultados y conclusiones se redactaron mediante un análisis de todo el trabajo realizado.

#### 2.4 Tratamiento de la información:

Determinado el problema de investigación, junto con las preguntas orientadas a agotar el tema; la investigación de carácter documental y cualitativo requirió de la recolección de los datos pertinentes, siendo esta información tratada y sintetizada a través de diagramas y mapas mentales, así como también mediante fichas bibliográficas que sirvieron para empaparse del tema.

También se consultó autores que, en trabajos de tesis, aplicaron un particular enfoque para resolver una problemática real, al tratarse de trabajos de pares en investigación, se consigue diversos enfoques, que ayudan a entender el tema desde diversas aristas que solo se puede conseguir cuando se trata de implantar una solución, enriqueciendo la perspectiva que se tiene acerca de esa parte del conocimiento.

Con la ayuda citada, en lo que sigue, se consultaron y desplegaron los conocimientos provenientes de entendidos, de fuentes como libros texto y de artículos científicos que con cierta profundidad complementan el llamado conocimiento base para dar respuesta a cada interrogante de la sistematización del problema; obteniendo de esta manera conocimiento nuevo que se muestra como resultados y posteriormente en las conclusiones.

## CAPÍTULO 3: MARCO DE REFERENCIA

### 3.1 Estado del Arte:

**El trabajo correspondiente a Ramírez (2014) quien realizó una investigación titulada: “Potencial de energía calorífica de los residuos sólidos municipales para reemplazar el carbón mineral”, explica que:**

La industria cementera es un campo interesante para el desarrollo y la aplicación de combustibles derivados de residuos. Los residuos sólidos con alto poder calorífico se utilizan en la industria cementera para realizar el coprocesamiento, una técnica que se utiliza para aprovechar residuos y su valor energético para sustituir el carbón con el fin de reducir el impacto en el medio ambiente disminuyendo las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero).

El carbón es el combustible fósil clave para la producción de clinker en las cementeras, siendo este proceso el más costoso en cuanto a la fabricación del cemento. En la investigación se calculó y realizaron comparaciones del poder calorífico proporcionado por el carbón mineral, así como también diferentes residuos sólidos urbanos, priorizando aquellos residuos que no se lograron reutilizar o reciclar.

Se observó que para la producción de 4500 Ton de clínker se requiere 22.18 TJ, lo cual implicaría un requerimiento de 765 Ton de carbón. A continuación, se muestra el cálculo de poder calorífico de diferentes residuos. Los siguientes datos pueden incrementarse dependiendo de las condiciones ambientales establecidas, favoreciendo de gran manera para el reemplazo del carbón. Los 8.542 MJ/kg pueden incrementarse incluso hasta un 11.454 MJ/kg, utilizando un programa eficiente de gestión de residuos.

Componente de RDF	Poder calorífico (MJ/Kg)
Papel	0,424
Cartón	0,276
Residuos de jardín	2,086
Residuos de textiles	3,599
Residuos de madera	1,411
Residuos de plástico	0,746
<b>Total</b>	<b>8,542</b>

*Tabla 1 Poder calorífico teórico de los componentes del RDF Refuse Derived Fuels potencial elaborado a partir de los RSU de la Provincia de Guanentá*  
*Fuente: (Ramírez, 2014)*

Para el requerimiento de clínker ya redactado se necesitarían 2270.5 Ton/mes de residuos. En el caso de la provincia de Guanentá la generación de residuos es menor al requerido, realizando cálculos se llegó a la conclusión que la producción de combustible derivado de residuos de alta calidad podría llegar a generar 122 Ton/mes. Se sabe que mientras más poder calorífico tengan estos residuos, la eficiencia de reemplazo al carbón será mucho mejor, pues a más cantidad de MJ/Kg, el porcentaje de sustitución será mayor.

Por otro lado, la emisión de carbono por el reemplazo los combustibles derivados de residuos disminuyen considerablemente como se observa en las siguientes tablas las cuales utilizan datos detallados anteriormente.

GE emitido	Energía del proceso (TJ)	Factor de conversión IPCC-UPME 2010 (KgCO <sub>2</sub> /mes)	Emisiones de GE (Ton/mes)
CO <sub>2</sub>	22,18	94425	2094,50
CO	22,18	20	443,60
SO <sub>2</sub>	22,18	692	15.348,50
CH <sub>4</sub>	22,18	10	22,10
N <sub>2</sub> O	22,18	14	31,10
<b>Total mes</b>			<b>17901</b>
<b>Emisiones de GE (Ton/año)</b>			<b>214.815</b>
<b>Otros gases y materiales de interés ambiental</b>			
HC	22,18	259	5.744,60
PM <sub>10</sub>	22,18	-	22,18

Tabla 2 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del proceso productivo. Fuente: (Ramírez, 2014)

GE emitido	Energía del proceso (TJ)	Factor de conversión IPCC-UPME 2010 (KgCO <sub>2</sub> /mes)	Emisiones de GE (Ton/mes)
CO <sub>2</sub>	0,922	0,076	70,75
CO	0,922	1000	922,00
SO <sub>2</sub>	0,922	-	0,92
CH <sub>4</sub>	0,922	30	27,66
N <sub>2</sub> O	0,922	4,0	3,69
<b>Total mes</b>			<b>1025,02</b>
<b>Emisiones de GE (Ton/mes)</b>			<b>12.300,24</b>
<b>Otros gases y material de interés ambiental</b>			
HC	0,922	-	0,922
MP <sub>10</sub>	0,922	-	0,922

Tabla 3: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero utilizando Combustibles derivados de residuos en reemplazo del carbón mineral. Fuente: (Ramírez, 2014)

Se observa que el carbono emitido de los combustibles derivados de residuos son aproximadamente el 5.72% de las emisiones normales del proceso. Cabe resaltar que el incremento de poder calorífico repercute en este reemplazo de carbón, logrando mejores resultados en cuanto a emisiones.

**En un artículo titulado Montiel-Bohórquez & Pérez (2018) “Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas para Optimizar el Desempeño de Centrales Térmicas”.** Se explica que:

Tras la generación masiva de los residuos sólidos urbanos es importante establecer una gestión de los mismos, llegando a alternativas de valorización de residuos. De esta manera los residuos sólidos más que un problema lograría convertirse en un recurso.

El estudio realizado se centra en la ciudad de Medellín, donde se manejó el cálculo de valoración energética de los diferentes residuos sólidos de la ciudad, tomando en cuenta su caracterización. Entre los residuos recaudados y analizados se tomó en cuenta materia orgánica, plástico, cartón, tetra pak, textiles, cuero y papel; excluyendo el metal y vidrio. Se demostró que la humedad no es un buen aliado de conversión de RSU a gas.

Se deben realizar estudios y estrategias estequiometrias a los residuos sólidos urbanos (RSU) con el fin de evaluar su poder calorífico y desarrollar una mayor eficiencia de reemplazo.

Si bien el reemplazo de combustibles fósiles por residuos sólidos puede ser manejados de diferentes formas, en el artículo (Arena, 2012; Castaldi et al., 2017; Luz et al., 2015) nos dice que la gasificación es una técnica que busca realizar una combustión total, pero a diferencia de la incineración, ésta emitiría menos gases contaminantes.

Definitivamente el artículo brinda un soporte de información hablando no solo sobre la caracterización, análisis y las diferentes técnicas de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos sino también va en el sentido en que debemos empezar a ver los residuos sólidos como una solución en muchos aspectos y no como un problema.

Además, nos proporciona un dato interesante sobre los residuos sólidos, y es que estos tienen un potencial eléctrico primario que puede ser aprovechado en la industria termoeléctrica en reemplazo del carbón en su mayoría de casos. En el artículo de la UPME (2017) nos dice que: “a partir de los RSU generados en la ciudad

de Medellín, se tiene un potencial energético-eléctrico que varía entre 27,7 MWe y 44,4 MWe, esta potencia podría suministrar la electricidad a 53.353 y 85.519 hogares, respectivamente, con un consumo promedio de energía per cápita de 1,137 MWh/año.

En relación con el artículo anterior, conforme al aprovechamiento de residuos sólidos en la industria eléctrica, por su potencial eléctrico **Arango & Arroyave (2016) en su artículo titulado “Análisis de combustibles fósiles en el mercado de generación de energía eléctrica en Colombia: un contraste entre modelos de volatilidad”**. concluye que; es una necesidad recurrir a fuentes alternativas como los residuos sólidos con el fin de no depender de los recursos tradicionales. Sin embargo, en Colombia aún no cuentan con la tecnología, ni la disponibilidad de recursos para implementar este proyecto, que iría desde una gestión de residuos hasta la incineración propiamente dicha.

**Por otro lado, Durán (2014) en su artículo “Fabricación de combustibles derivados de residuos (CDR) para la industria”** nos habla sobre:

La importancia de los combustibles derivados de residuos (CDR) como una gestión de residuos tentativa para la producción de energía en la industria. Entre los sectores tentativos se tienen a la industria siderúrgica, pequeñas centrales eléctricas y las cementeras especialmente ya que el 30% de sus costos de operación son destinados a la energía, debido a su alta demanda de energía térmica en los hornos.

Para la obtención de los CDR nos explican que existe un tratamientos de los residuos previo como la pre trituración, separación de algunos metales, separación de materiales pesados y la trituración, siendo importante esta preparación de materiales ya que repercute directamente en el rendimiento del proceso.

Estos combustibles son aplicables en sectores como el cementero donde obtienen buenos resultados por su excelente adaptación en esta industria, debido a que se emplean altas temperaturas en las operaciones y el tiempo de resistencia para asegurar la destrucción de las moléculas de estos residuos es el adecuado para el proceso. Además, este sector trabaja con una estabilidad térmica adecuada la cual evita situaciones anormales de trabajo, y no se generan emisiones de gases ácidos por las características que posee el horno. También se puede emplear estos combustibles

en centrales de ciclo combinado, plantas de cal, centrales térmicas e incluso calderas industriales.

**Otra investigación realizada por Diez, Álvarez, & Melendi (2012) titulada “El proceso siderúrgico como vía de reciclado de residuos plásticos.”** Nos habla sobre:

La industria siderúrgica tiene como principal materia prima al coque metalúrgico, este elemento es utilizado en los hornos como combustible, agente reductor, soporte estructural y permeable de la carga del mineral de hierro y carburante del arrabio.

La investigación explica sobre la capacidad de reemplazo del plástico por el carbón coquizable, el cual puede utilizarse como un agente reductor en el proceso de coquización en el horno, considerando como factores claves la estructura química y el comportamiento térmico de los plásticos para el correspondiente coprocesado. La gasificación de esta materia (plástico) lleva a la obtención de un gas de síntesis, permitiendo así el incremento de gases reductores en el horno alto, generando temperaturas superiores a los 2000°C.

Uno de sus objetivos implica la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Tras una evaluación incorporando un 2% de residuos plásticos en las mezclas de carbón para la producción de coque, supone una baja del 2% de CO<sub>2</sub>, y al incorporar plásticos en la producción de gas de síntesis en el horno alto la reducción es de 7%, teniendo en total una disminución global del 9%. Siendo este coprocesamiento en la industria siderúrgica considerada como una técnica atractiva para el sector en cuanto a disminución de emisiones y ahorro.

Del análisis de los trabajos previos se obtiene como conclusión que la propuesta de reemplazo de combustibles fósiles por residuos es totalmente viable para industrias como la cementera, siderúrgica, plantas de cal y eléctricas. Teniendo como residuos sólidos alternativos a los residuos plásticos, cartón, papeles, materia orgánica, textiles.

Es importante recalcar que tanto la recaudación como la evaluación energética de los residuos sólidos constituyen los procesos más importantes previos a su uso, ya que sólo de esta manera se logrará llegar a un reemplazo efectivo y eficiente de los combustibles, además

de conseguir un resultado favorable con respecto a la generación de gases de efecto invernadero.

### **3.2. Marco teórico – conceptual:**

A continuación, se desarrollan los conceptos básicos relacionados al tema de investigación, con el objetivo de una mejor comprensión del tema. Además, se responderán los objetivos específicos en orden, con el fin de abordar el tema de una manera más ordenada, sistematizada y objetiva.

Iniciamos con la definición de los combustibles fósiles, describiendo sus definiciones tanto del gas natural, el carbón y petróleo, la situación y uso de los mismos.

Continuamos con la descripción y clasificación de los residuos sólidos, considerando la clasificación dada por el Ministerio del Ambiente (MINAM), además de la gestión que se hace con estos residuos desde el proceso de tratamiento hasta la valorización, también a nivel local considerando los criterios de esta misma entidad.

Luego presentamos la normativa ambiental nacional, la Norma General del Ambiente, donde se hace una revisión al decreto que regula las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria, enfatizando los límites máximos permisibles propuestos por el gobierno, así como también la normativa de los residuos sólidos, su gestión, tratamiento y aprovechamiento.

Finalmente se redactan conceptos sobre los combustibles derivados de residuos sólidos (CDR) donde se presentan las características a evaluar para hacer una sustitución provechosa de los combustibles fósiles. También se describen las diferentes técnicas de sustitución que se utilizan actualmente en la industria, dando a conocer que es una idea completamente viable y que se aplica hoy en día.

#### **3.2.1. Combustibles Fósiles**

##### **3.2.1.1. Petróleo**

El petróleo es una sustancia combustible, negra viscosa, líquida a temperatura y presión normales. Se dice que la descomposición de seres vivos, como animales, componen la formación de este compuesto conjunto con las capas que se van formando a través de los miles de años depositándose los diferentes minerales sobre los restos óseos hasta convertirse en petróleo. (Vázquez, 2008)

En cuanto a la extracción de petróleo Vázquez (2008) nos dice que se sabe que la técnica más utilizada actualmente se realiza mediante la perforación rotatoria, con ayuda de oleoductos se llega hacia los tanques de almacenamiento, desde allí se envía a su destino.

<b>Países</b>	<b>Miles de millones de barriles</b>
Arabia Saudi	265,3
Irak	115,0
Kuwait	98,0
Iran	96,4
Emiratos Arabes Unidos	62,8
Rusia	54,3
Venezuela	47,6
China	46,6
Libia	30,0
Mexico	26,9
Nigeria	24,1
Estados Unidos	22,0
Argelia	12,7
Noruega	10,1

*Tabla 4 Existencias actuales de petróleo (Vázquez, 2008)*

Según la Tabla 4 “En el año 2006 quedaban en el mundo entre 990.000 millones y 1,1 billones de barriles de crudo por extraer, reservas se agotarían hacia el año 2043” (p. 58). Sin embargo, no se considera el aumento de requerimiento de energía que exige la misma población, que va ligada a la producción de industrias para abastecer la creciente demanda que es directamente proporcional con el crecimiento de la población a nivel mundial.

Además, Vázquez (2008) infiere que la dependencia del petróleo se queda reflejada con el siguiente dato “En el año 1880 la producción mundial, localizada casi por completo en Estados Unidos, era inferior al millón de toneladas. Hoy, la producción supera los 3.500 millones de toneladas” (p. 59)

- El cenit del petróleo

Para hablar del término cenit del petróleo debemos recurrir a la curva de Hubbert, una gráfica que representa la vida útil del petróleo. En esta curva se observa como la producción de petróleo se hace más fácil conforme a la extracción, sin embargo, también se explica que, al llegar a la cumbre de la curva, empieza la caída de esta, lo que significa que, el petróleo mientras más escaso sea, más difícil resulta su extracción, es decir, implica mayores costos, además este último tramo contiene el crudo de baja calidad. Se llega a un punto en el que ya no tiene sentido extraer pues significaría un costo mayor que la misma venta de este. (Vázquez, 2008)

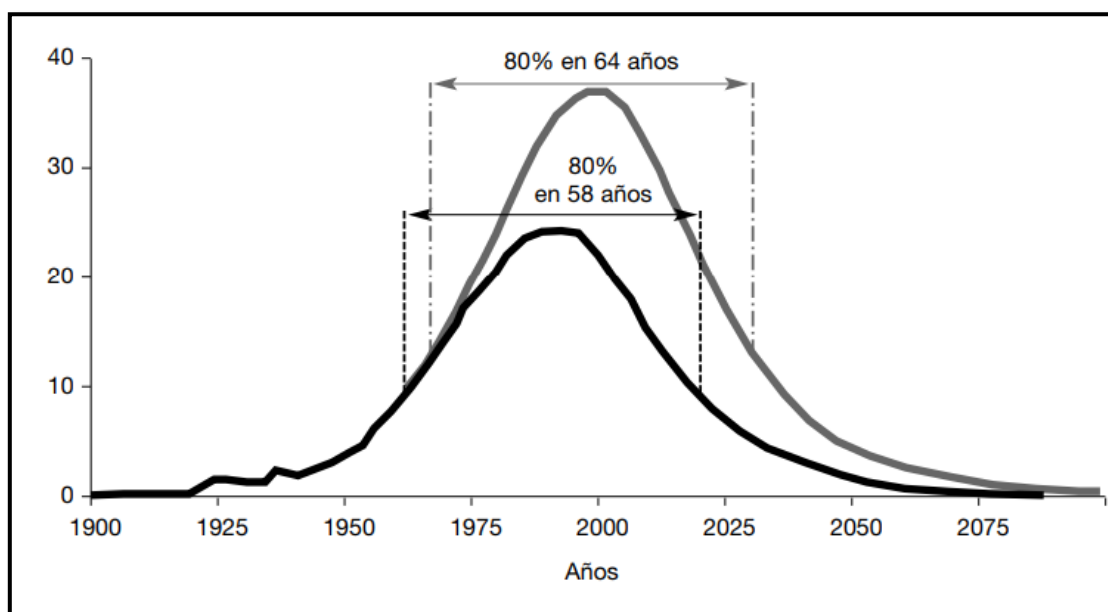


Ilustración 4 Proyección de la producción mundial de petróleo Fuente: (Hubbert,1971) publicada en *Scientific American*

### 3.2.1.2. Carbón

Según León D ( 2006 ) el carbón es un combustible fósil, el cual posee un alto poder calorífico. Las reservas del carbón oscilan una duración de aproximadamente 220 años considerando el actual consumo. Es un recurso con alto contenido de azufre, es sucio y uno de los principales causantes de la lluvia ácida debido al SO<sub>2</sub> que expelle.

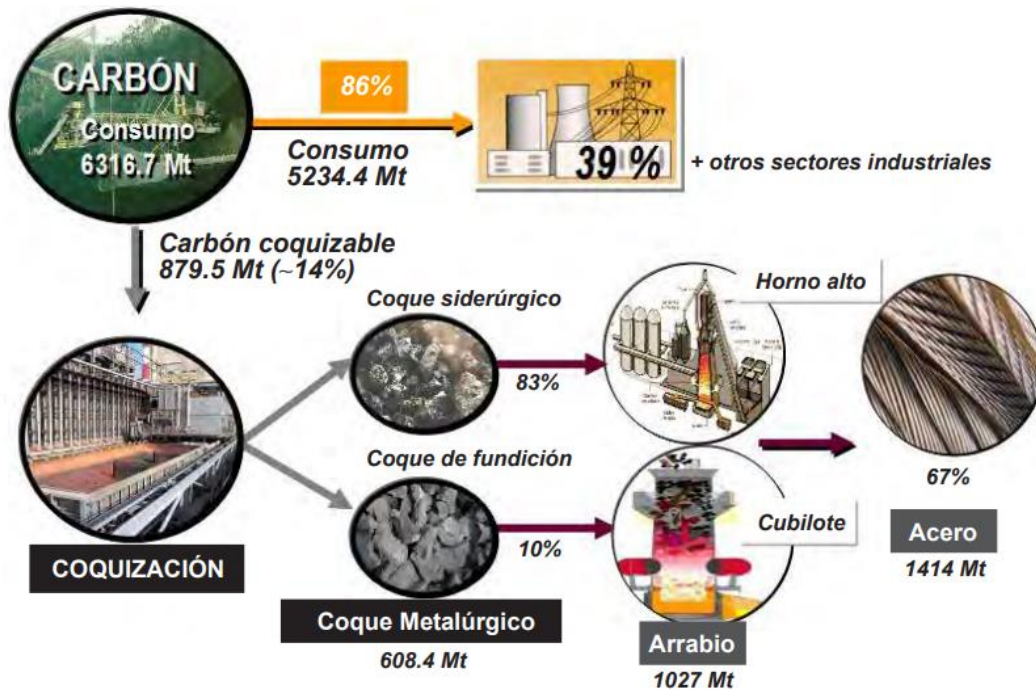


Ilustración 2 Consumo de carbón y producción de coque, arrabio y acero (2010)  
Fuente: (Diez, Álvarez, & Melendi, 2012)

La ilustración nos muestra el consumo de carbón tanto en la utilización como la producción de energía. Generando en el mundo el 39% de energía eléctrica, además de la producción de coque.

Tipos de carbón:

El carbón es utilizado en diferentes industrias, y para cada una de ellas se utilizan diferentes tipos, (Rojas, 2008) detalla que en la industria peruana se emplean los siguientes:

- Antracita:

Conocido también como carbón duro o carbón de piedra, el cual maneja un poder calorífico mayor a 32.6 MJ/kg, además de un alto contenido de carbono de aproximadamente 86% al 98%. La utilización del carbón antracita se manifiesta en el sector siderúrgico, la industria carboquímica y plantas de carbón eléctricas. En el Perú es un agente consumidor en los procesos de producción de cemento, ladrillo, como también en industrias de hierro y acero. (Rojas, 2008)

- Bituminoso:

Es conocido también como carbón coquizable. Tanto el contenido de carbono como el poder calorífico es menor que el carbón antracita. Los procesos siderúrgicos, la generación de vapor, como también la producción de energía térmica son su uso más común. (Rojas, 2008)

- Sub bituminoso:

El cual contiene una composición de carbono entre 35% y 45%. Su poder calorífico es menor que el carbón bituminoso. Es un elemento volátil. Su uso se ve en la producción de energía eléctrica y térmica. (Rojas, 2008)

- Lignito y turba:

La humedad y el contenido de ceniza de este tipo es alto, lo cual origina un bajo poder calorífico. Normalmente son utilizados para generar energía eléctrica. Calefacción, y en generadores de vapor de agua. (Rojas, 2008)

### 3.2.1.3. Gas Natural

El MINEM (2014) nos dice que el gas natural “Es un combustible compuesto por un conjunto de hidrocarburos livianos, el principal componente es el metano (CH<sub>4</sub>).” (p. 11), además se puede encontrar dos tipos de yacimientos los cuales son “gas natural asociado” y “gas natural no asociado”, donde en uno se encuentra este pero acompañado de petróleo y en el otro solo es un yacimiento de gas natural.

El gas a pesar de ser un combustible fósil no renovable, se puede tomar como alternativa antes que el petróleo y el carbón, pues el impacto ambiental que genera es menor comparado a los dos ya mencionados. En el caso de la industria eléctrica, las plantas de termoeléctricas que queman carbón o petróleo, deben considerarse reemplazarlas por plantas de cogeneración donde producen electricidad y calor con el mínimo impacto ambiental. En cuestión de costos, una central térmica a gas cuesta aproximadamente la mitad en relación a otra central que quema carbón importado, además se consume un porcentaje considerablemente menor de combustible. (MINEM, 2014)

Cáceres Graziani (2002) nos dice que la utilización del gas natural en la industria puede observarse en centrales térmicas generadoras de electricidad, así como también hornos de plantas productoras de cemento, ladrillos, vidrios, entre otros.

Se sabe que la fractura hidráulica es una técnica que sirve para extraer gas, debido a la gran demanda de combustibles fósiles y a la creciente población, el mismo mercado es el que exige el avance de tecnología en los métodos de extracción, ya sea de gas o petróleo. En Argentina se evaluó el “fracking” como técnica de extracción donde se ejecuta una perforación de roca con la ayuda de componentes como agua, aditivos químicos y arena. Sin embargo esta técnica es muy polémica pues no se sabe con certeza el impacto ambiental que causaría en un futuro, las opiniones son divididas, pero se teme debido a la magnitud de esa técnica se cree en su mayoría que el impacto ambiental sería muy negativo, cabe resaltar que esta técnica es bastante productiva para la extracción, a tal punto que se considera que a partir de esta Argentina se podría volver una potencia de productora energética. (BBC, 2013)

### 3.2.2. Residuos Sólidos

Los residuos sólidos son sustancias, productos o subproductos que se generan en diferentes campos y se encuentran tanto en estado sólido o semisólido, teniendo en cuenta la normatividad nacional en cuanto a respectiva generación para el control de diferentes riesgos los cuales tienen un impacto negativo en la salud y el ambiente. Motivo por el cual se impulsa a mejorar el manejo de los mismos según diferentes sistemas que se adapten, considerando diferentes características de los residuos. (MINAM, 2017)

#### 3.2.2.1. Clasificación

Para clasificarlos el MINAM (2017) toma en cuenta diferentes aspectos,

Según su origen: Los cuales pueden ser domiciliarios, comerciales, industriales, del sector agropecuario, provenientes de actividades de construcción, de establecimientos de atención de salud o incluso de limpieza de espacios públicos. (MINAM, 2017)

Por su peligrosidad: Los cuales pueden ser residuos peligrosos o no peligrosos. Según el MINAM (2017) se considera residuos peligrosos a los que presentan un impacto negativo significativo para el ambiente o la salud debido a sus características. Por otra parte, los residuos no peligrosos son aquellos que por las propiedades que poseen no presentan algún peligro significativo para la salud o ambiente. (OEFA, 2013)

Por su naturaleza podemos encontrar residuos orgánicos los cuales OEFA (2013) son aquellos que tienen una descomposición natural, de los cuales se desprenden gases entre ellos dióxido de carbono y metano. Los residuos inorgánicos por otro lado son aquellos que no poseen la propiedad de degradarse con facilidad, su origen es mineral. Además, se suelen reaprovechar en procesos de reciclaje y requieren de la implementación de plantas de tratamiento para su correcta gestión. (OEFA, 2013)

### 3.2.3. Normativa

#### 3.2.3.1 Decreto Legislativo N°1278

##### **Disposiciones generales para la Gestión y Manejo de los Residuos Sólidos**

Sobre la gestión de residuos sólidos MINAM (2017) nos dice que, este decreto excluye a residuos de carácter especial, es decir, los residuos radioactivos, residuos militares, residuos líquidos, así como también las emisiones gaseosas y material particulado.

La finalidad de este capítulo se basa en 3 premisas:

- La prevención y minimización sobre la producción de residuos sólidos
- Aprovechar el valor energético según su valorización de los residuos sólidos
- Tener instalaciones con las especificaciones adecuadas para la disposición final de los residuos sólidos

El decreto clasifica a los residuos sólidos según su origen (municipales y no municipales) y según su peligrosidad (peligrosos y no peligrosos).

Sabiendo esta información, el decreto anuncia un protocolo de gestión de residuos sólidos de la siguiente manera. (MINAM, 2017)

Sobre el manejo y gestión de residuos sólidos

### **Segregación y almacenamiento**

#### **- Sobre la segregación**

Nos dice que se realiza la separación justo en el lugar donde se realizó la valorización de residuos sólidos, cabe especificar que este lugar debe ser debidamente autorizado. (MINAM, 2017)

#### **- Segregación en residuos sólidos municipales**

Empieza con que el productor de los residuos entregue estos al servicio de limpieza pública, de preferencia, debidamente clasificados con el fin de facilitar mejor su reutilización. Seguido, estos residuos se entregan a las municipalidades en donde se hará la correcta diferenciación de residuos en base a criterios ya establecidos. (MINAM, 2017)

#### **- Segregación en residuos sólidos no municipales**

De la misma forma el productor debe entregar los residuos debidamente separados y diferenciados a un encargado autorizado con el fin de afianzar su aprovechamiento posterior. (MINAM, 2017)

### **Almacenamiento**

Se almacenarán los residuos sólidos según su peso, volumen, características tanto físicas como químicas, así como también biológicas. (MINAM, 2017)

### **Recolección y transporte**

#### **Recolección**

Debe ser una recolección sostenible, esto quiere decir que esta gestión se debe realizar con las disposiciones ya dadas, siguiendo una metodología,

cabe mencionar que los operadores recicladores también entran en este sistema de recolección. (MINAM, 2017)

### **Transporte**

En este caso, la ejecución de transporte se realiza principalmente por dos operadores, las municipalidades y las Empresas Operadoras de Residuos Sólidos autorizadas (EORS), donde básicamente se encargan en el traslado de estos residuos sólidos ya sea hacia a un lugar autorizado para hacer la respectiva valorización o a su disposición final.

En el caso de los residuos sólidos peligrosos se seguirá la normativa para el traslado de estos. (MINAM, 2017)

### **Valorización**

La valorización como se mencionó anteriormente debe ser realizada por operadoras debidamente autorizadas con el fin de sacar el mayor provecho de los residuos. Esta valorización se debe hacer antes de darle una disposición final a los residuos y entran técnicas y criterios como la reutilización, reciclaje, valorización energética entre otras, cabe mencionar que las instalaciones donde se realice la valorización deben tener los requisitos adecuados en cuestión a la infraestructura según la norma. (MINAM, 2017)

#### **3.2.3.2. Ley N°28611 Ley General del Ambiente**

La ley General del ambiente nos habla de aquellos derechos que poseen los ciudadanos como el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para un correcto desarrollo de la vida, el cual detalla el primer artículo, explica que se debe velar y manifestar su contribución en la gestión ambiental cuidándola y así asegurando la salud del prójimo, incluyendo la conservación de la bio diversidad y un manejo equilibrado de recursos con el objetivo de manejar un desarrollo sostenible. (MINAM, 2005)

Además, con respecto a la responsabilidad ambiental el artículo IX nos habla de las consecuencias por degradación del ambiente y sus componentes, para esto

existen ya procedimientos según sea conveniente que implican la restauración, rehabilitación o reparación, para lo cual se debe tomar en cuenta la ley N°29325 Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (MINAM, 2005)

Por otro lado, el Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental se dirige a las empresas que manejen actividades como construcciones, obras, servicios y otras, explicando que existen regulaciones asignadas por el SEIA, donde se manejan estudios de Impacto Ambiental, los cuales son herramientas de gestión que manifiestan una representación de las actividades junto con los efectos que estos producen al ambiente, tanto a corto como a largo plazo, para esto las organizaciones deben señalar las medidas que optarán contribuyendo con la disminución del daño que emiten. (MINAM, 2005)

El artículo 31 al hablarnos del estándar de calidad ambiental considera el nivel de concentración de los elementos, sustancias físicas, químicas y biológicas, los cuales no deben generar algún riesgo para la población ni el ambiente. Por lo tanto, existen parámetros que deben utilizarse para las distintas operaciones. (MINAM, 2005)

En cuanto a los estándares se habla de “El Límite Máximo Permissible - LMP, es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente” (MINAM, 2005, p. 34). Este parámetro tiene una relación con el nivel de protección ambiental ya establecido, ayudando así a no exceder la capacidad de carga de los ecosistemas.

### 3.2.3.3. Decreto Supremo N°001-2020-MINAM: Aprueban Límites Máximos Permisibles para emisiones atmosféricas de plantas industriales de fabricación de cemento y/o cal

Se manifiesta el siguiente decreto con el fin de regular la operación del coprocesamiento en la industria del cemento y/o cal. Siendo este proceso una alternativa para la valoración energética de los residuos, donde se aprovechará el potencial energético de los mismos como alternativa de sustitución de combustibles fósiles en los hornos. Según los LMP se controlarán las emisiones que generan las plantas industriales de fabricación de cemento y/o cal, teniendo como finalidad

mejorar la calidad del aire, regulando las fuentes de emisiones industriales. (MINAM, 2020).

El artículo 1 manifiesta los nuevos parámetros de límites máximos permisibles para las plantas industriales de cemento y/o cal. Esta medición se realizará en las chimeneas permitiendo el monitoreo de las emisiones.

Parametro	Tipo de fuente fija	Límite máximo permisible (mg/m <sup>2</sup> )	Método de ensayo normalizado
Material particulado (PM)	Nueva	80	NTP. 900.005. Gestión Ambiental. Emisiones atmosféricas. Determinación de emisiones de materia particulada de fuentes estacionarias
	Existente	120	
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	Nueva y existente	500	NTP. 900.006. Gestión Ambiental. Emisiones atmosféricas. Determinación de emisiones de dióxido de azufre en fuentes estacionarias
		1800	
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	Nueva y existente	1400	NTP. 900.007. Gestión Ambiental. Emisiones atmosféricas. Determinación de emisiones de nitrógeno en fuentes estacionarias
Mercurio (Hg)	Nueva y existente	0,1	EPA CFR Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Parte 60. Método 29 del apéndice A-8: Determinación de metales en emisiones desde fuentes estacionarias

*Tabla 5 LMP para emisiones atmosféricas de plantas industriales de fabricación de cemento y/o cal (MINAM, 2020)*

### 3.2.4. Gestión de Residuos Sólidos

La gestión de los residuos conlleva un manejo sustentable e integral tomando en cuenta diferentes alternativas que van desde la recolección hasta el procesamiento de los mismos observando su flujo de generación, tomándolo como una vía para la detección de beneficios tanto en el aspecto ambiental como en lo económico, con resultados sociales positivos. (Ruíz, 2001)

Hoy en día las técnicas más conocidas en la gestión es la reutilización y el reciclaje, pero también se existen tratamientos donde se recupera la energía de los residuos, dándoles mejores usos como en el compostaje o la incineración, en caso los residuos sean peligrosos se disponen en rellenos sanitarios mediante un protocolo ya establecido. (Ruíz, 2001)

Según el INEI (2014) La finalidad de la gestión de residuos es asegurar un manejo sostenible de los mismos, teniendo en cuenta las diferentes políticas, planes y acciones exigibles, considerando tanto las posibilidades económicas como las técnicas que involucran su cumplimiento.

### 3.2.4.1. Valorización de residuos

Una forma de gestionar los residuos para Fenercon (2010) es mediante la valorización energética de los residuos, esta es una operación a la que se da prioridad frente a otras operaciones como la eliminación, es decir los vertederos. La recuperación de energía puede considerarse en incineradoras y hornos industriales.

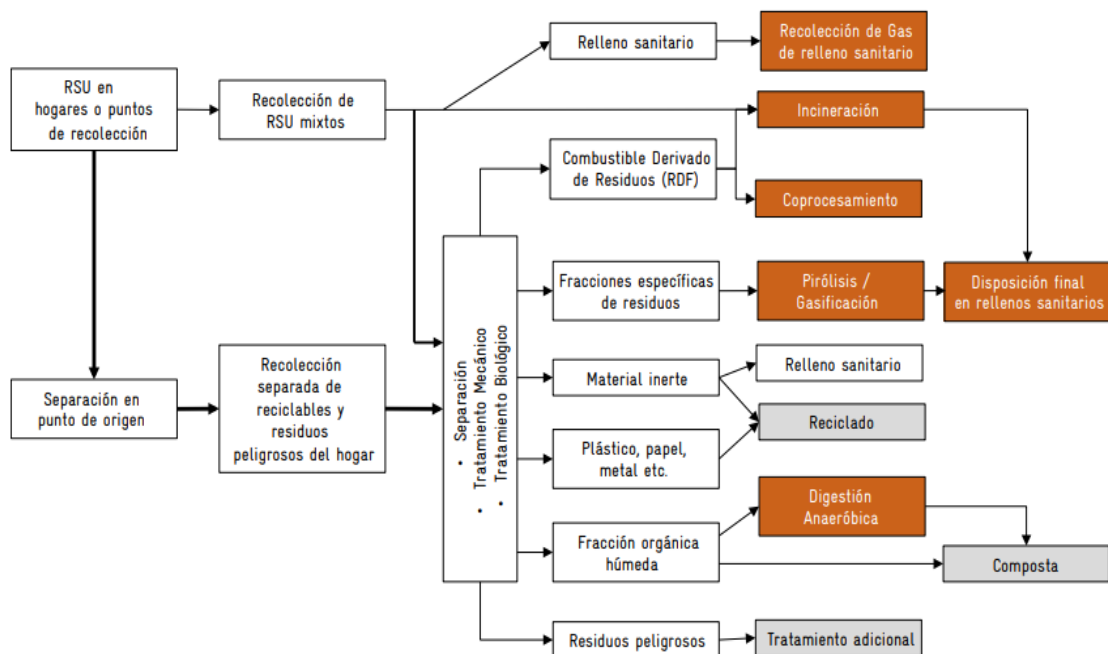


Ilustración 3: Panorama del flujo de materiales de los RSU y sus diferentes opciones de utilización y tratamiento  
Fuente: (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)

El aprovechamiento energético de residuos conlleva un tratamiento de los mismos que tiene como finalidad recuperar su energía transformándolos en electricidad, calor o en el mejor de los casos combustibles alternos. Existen diversas tecnologías que aprovechan los diferentes residuos por la energía que contienen, algunos de ellos son: la incineración, coprocesamiento, pirólisis/gasificación, entre otros. (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)



Por otro lado, se describe que los Combustibles Derivados de Residuos (CDR) Refuse Derived Fuels (RDF), proceden de la combinación de diversos tipos de residuos y al ser un combustible el análisis de su aprovechamiento energético involucra un buen nivel de poder calorífico y bajo contenido de cloro. (Costa, y otros, 2017)

#### 3.2.5.1. Elementos críticos de los CDR:

Según (ERFO, 2010) los combustibles derivados de residuos contienen una caracterización especial para su funcionamiento adecuado, considerando como elementos críticos a:

- a) Poder calorífico el cual es usualmente expresado en MJ/Kg
- b) El cloro y el contenido que presenta, siendo un factor crítico en cuanto a la formación de dioxinas, además de la generación de problemas de corrosión. Es normalmente expulsado por el PVC de los residuos.
- c) Contenido de azufre, causante de emisiones de dióxido de azufre como de problemas de corrosión.
- d) Contenido de metales pesados, entre ellos y en especial el mercurio, el cual determina las emisiones de estos metales.
- e) Las cenizas, este factor influye en la disminución del poder calorífico de los residuos demandando el vertido del mismo.
- f) Humedad, el cual es un factor en el grado de poder calorífico del residuo.
- g) Contenido de biomasa, que determina las emisiones en las industrias.

#### 3.2.5.1. Manejo de los CDR Combustibles derivados de residuos en la Industria

##### a) Incineración

La incineración es una técnica de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos, en donde en una se realiza una combustión completa de estos aprovechando su poder calorífico. Es una gran opción en medida que se deshace en mayor volumen de los residuos sólidos con respecto a la

gasificación, generando un impacto positivo en la gestión de residuos, deshaciéndose prácticamente de estos por completo. (Montiel-Bohórquez & Pérez, 2018)

Según Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross (2017) la incineración de residuos sólidos consiste en la quema de residuos, teniendo como objetivo la reducción del volumen y masa de los mismos para transformarlos químicamente en materiales inertes, recuperando así la energía, minerales y metales del flujo de residuos.

Esta tecnología opera con una temperatura de reacción que va entre 850°C y 1450°C, liberando energía térmica. Es necesario considerar el poder calorífico de los residuos ya que permitirá generar la reacción térmica en cadena y una combustión auto sostenible, no siendo necesario la incorporación de otros combustibles. Durante el proceso existe una liberación de gases, los cuales contienen una gran parte de energía. “El calor excesivo de la combustión se puede usar para generar vapor y producir electricidad, para calentamiento/enfriamiento por redes o para suministrar vapor a procesos industriales cercanos” (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017, p. 21)

Según The World Bank (1999) en la incineración un índice importante es la energía que el residuo contiene, es decir el poder calorífico interno PCI. Además, nos dice que “Para asegurar la combustión autotérmica del residuo, el PCI no debería ser menor a 7 MJ/kg en promedio a lo largo de un año” (p. 53)

<b>Fracción removida</b>	<b>Impactos principales de la remoción sobre los residuos remanentes</b>
Vidrio, metales, ceniza, minerales de residuos de construcción y demolición	Mayor valor calorífico Menor cantidad de escoria y metales recuperables
Papel, cartón, plástico	Disminución del poder calorífico Disminución de las cargas de cloro (por ej. del PVC) en las emisiones
Residuos orgánicos de cocina y jardín	Menores cargas de humedad Mayor poder calorífico
Residuos voluminosos	Menor esfuerzo para triturar los residuos
Residuos peligrosos (ej. Baterías, dispositivos electrónicos)	Menor esfuerzo para remover materiales pesados volátiles tóxicos de las emisiones al aire (ej. Mercurio) Reducción en la concentración de contaminantes tóxicos en escorias y cenizas volantes (ej. Cadmio, plomo, zinc)

*Tabla 6 Influencias de la separación previa de reciclables sobre la incineración Fuente: (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)*

## b) Gasificación

La definición de gasificación según (Montiel-Bohórquez & Pérez (2018) nos dice que es una técnica la cual aprovecha los residuos sólidos urbanos, y los gases que estos emiten como el metano, con el fin de utilizarlos como combustible y así poder sustituir los combustibles fósiles.

## c) Pirólisis / Termólisis

Fenercon (2010) nos explica que la pirólisis consiste en el tratamiento de los residuos a temperaturas entre 800 y 1100°C, obteniendo como resultado un gas compuesto de metano, hidrógeno, monóxido de carbono, nitrógeno, agua y un residuo inerte.

La termólisis por otra parte utiliza una temperatura de 400°C, en un reactor que carece de oxígeno totalmente. Esta combustión origina una destilación de residuos, que dan como resultado la generación de un gas combustible y un producto carbonado (coque), el cual puede utilizarse como carbón activo o valorizarse como combustible. (Fenercon, 2010)

## d) Coprocesamiento

El coprocesamiento consiste en la utilización de materiales provenientes de residuos que tienen la capacidad de reemplazar a distintos combustibles fósiles normalmente utilizados en la industria. Su aplicación se observa mayormente en el sector cementero, en plantas termoeléctricas, y en industrias de acero y cal. (Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross, 2017)

Los residuos sólidos utilizados en el proceso de coprocesamiento deben poseer distintas características entre ellas el alto valor calorífico, oscilando una cifra de 8 MJ/kg aproximadamente o un valor sustancial, el cual debe contener un porcentaje de cenizas del 50% u 80% de materia prima en cenizas. Si bien es cierto la industria del cemento es la que presentó mejores resultados al utilizar el coprocesamiento en sus procesos, este tratamiento es adaptable para diversas industrias en las que se consumen en gran medida recursos y energía. (GTZ Gesellschaft für Technische, 2009)

La efectividad de combustión en el sector cementero lo vuelve atractivo para trabajar con este tratamiento ya que las temperaturas empleadas en el proceso son mucho mayores (1.000-2.000°C), teniendo como objetivo llegar a una temperatura de clinkerización de 1.450°C. Además, la destrucción de los elementos orgánicos es completa por el tiempo que los gases pasan a altas temperaturas. (Fundación CEMA, 2017)

Según Mutz, Hengevoss, Hugi, & Gross (2017) Los residuos que posean un alto contenido de cloro o mercurio pueden ser críticos para el tratamiento influyendo tanto en problemas operativos como en medio ambientales.

#### 3.2.3.3. Beneficios del uso de combustibles derivados de residuos

El ahorro de costes es un beneficio que genera el uso de CDR, ya que al utilizarlos en la industria se observa la oportunidad de eliminar las emisiones derivadas de los residuos de los combustibles derivados de residuos CDR, además del menor coste en comparación de los combustibles fósiles normalmente utilizados. (Puig, Jofra, & Calaf, 2012)

Después de revisar todos esos conceptos se concluye que, las preguntas planteadas en los objetivos específicos se han llegado a contestar satisfactoriamente, destacando que, la idea de sustitución, es algo que ya se aplica en otros países, siendo una idea necesaria para los sectores industriales que utilizan gran cantidad de combustibles no sólo por la nueva normativa, sino también por una cuestión de responsabilidad social.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 4.1 Resultados:

La situación actual del consumo de los combustibles fósiles utilizados en la industria, según la revisión efectuada, es la siguiente: Los principales combustibles fósiles empleados son el petróleo, el carbón y el gas natural y sus derivados. Su uso representa un problema debido a que en promedio más del 80% de la totalidad de energía dependen de ellos, a pesar de tener un cierto porcentaje de disminución en cuanto a su consumo este sigue siendo masivo. El carbón genera el 39% de energía eléctrica en el mundo y es empleado en el sector siderúrgico, el cementero, industrias de hierro y acero, así como también para la producción de energía térmica y eléctrica. Por otra parte, según el consumo de petróleo, se calcula que las reservas se agotarían aproximadamente en el año 2043, hacia el año 2008 la producción de este elemento superaba los 3500 millones de toneladas. Se debe considerar que, la utilización de combustibles fósiles maneja un consumo directamente proporcional al crecimiento poblacional, es decir, a mayor cantidad de personas mayor será el requerimiento de energía. El gas natural genera un menor impacto ambiental a comparación del petróleo y el carbón, siendo una alternativa a considerar antes que los mencionados anteriormente, demostrándose que una planta central térmica a gas reduce a la mitad el costo de una central térmica que utiliza carbón, además que emite una menor cantidad de gases de efecto invernadero.

Los residuos con alto poder calorífico que se identificaron básicamente son; madera, papel, cartón y plástico, con un poder calorífico de 1.411 MJ/Kg, 0.424 MJ/Kg, 0.276 MJ/Kg, 0.746 MJ/Kg, respectivamente, según la tabla 1. Además de materia orgánica, tetra pack, textiles. Son estos residuos los más comunes en el mundo, y quienes emiten 17 veces menos toneladas de gases de efecto invernadero al mes, en comparación con el proceso productivo del cemento empleando combustibles fósiles. Es importante aclarar que, los residuos sólidos dependen de la disposición que exista en la localidad, realizando su previa evaluación de valor energético o poder calorífico para así lograr un reemplazo eficiente.

Se identificaron dos normativas controladas por El Ministerio Nacional del Ambiente (MINAM), las cuales contemplan los parámetros de calidad de aire involucrando las regulaciones de CO<sub>2</sub> en el país, la Ley N°28611 Ley General del Ambiente, se dirige a las empresas cuyas actividades involucran un estudio de Impacto Ambiental, captando así los efectos que producen al ambiente tanto a corto como a largo plazo, requiriendo la respuesta de estas organizaciones sobre las medidas o acciones que emplearán para contribuir con la

disminución de daño que generan. Además, los estándares establecidos están explícitos en “El Límite Máximo Permisible - LMP” el cual contribuye con la regulación de carga de gases al ecosistema. Por otro lado, a inicios del presente año se manifestó el Decreto N°001-2020-MINAM donde se aprueban Límites Máximos Permisibles para emisiones atmosféricas de plantas industriales de fabricación de cemento y/o cal, en el cual detallan las nuevas disposiciones en cuanto a los nuevos límites de emisión permitidos en estas industrias, según la tabla 5, considerando la alternativa de valoración de residuos y su respectivo aprovechamiento como alternativa de sustitución de combustibles fósiles en sus hornos, reduciendo así la emisión de gases normalmente emitida.

En cuanto al manejo o disposición de Residuos Sólidos con alto Poder Calorífico para la disposición de residuos se hace referencia a la gestión y manejo para la disposición de los residuos sólidos, considerando como primer punto la clasificación o segregación de los mismos según su origen (comercial, industrial, domiciliario, etc.), su peligrosidad (peligroso, no peligroso) y su naturaleza (orgánicos, inorgánicos). Una vez segregados los residuos, se procede al almacenamiento según sus características, luego la recolección y transporte, gestionadas por las Empresas Operadoras de Residuos Sólidos (EORS) quienes se encargan del transportar los residuos hacia lugares autorizados para la correcta valorización y disposición final de éstos bajo las premisas de prevención y minimización, aprovechamiento energético, e instalaciones adecuadas.

Entre los sectores que emplean estos combustibles fósiles se puede encontrar a la industria de cal, yeso, eléctrica, siderúrgica, cementera. En las cementeras, se emplea el carbón en los hornos como materia principal de combustión. En la industria siderúrgica utilizan el coque metalúrgico como combustible, agente reductor, soporte estructural y permeable de la carga del mineral de hierro y carburante del arrabio. El carbón antracita es empleado en la industria carboquímica y plantas termoeléctricas. Además, otros derivados del carbón como el sub bituminoso, lignito y turba son usados para la producción de energía eléctrica y energía térmica. Por otro lado, el gas natural tiene un papel importante en centrales térmicas generadoras de electricidad, así como en hornos de plantas productoras de cemento, ladrillo y vidrios.

Se han realizado muchos esfuerzos por reemplazar los Combustibles Fósiles, tratando de encontrar sustitutos con suficiente disponibilidad y economía, algunos de los cuales muestra sostenibilidad futurista que hace deslumbrar que efectivamente se va por buen camino en

cuanto a la sustitución de combustibles fósiles por residuos sólidos, siendo esta técnica ya utilizada en diferentes industrias. El término empleado para este recurso es Combustible derivado de Residuos (CDR), los cuales son elaborados a partir de residuos no peligrosos. En el caso de la industria cementera, existen empresas que emplean el coprocesamiento presentando buenos resultados debido a las características que poseen los hornos que se utilizan para la elaboración del clinker, ya que, al manejar temperaturas elevadas los residuos se adaptan perfectamente a la combustión, asegurando la total destrucción de moléculas orgánicas, además la excelente estabilidad térmica en el proceso evita situaciones anormales en el respectivo funcionamiento, este proceso también puede ser empleado en plantas de cal, centrales térmicas e incluso calderas industriales. Por otro lado, la gasificación aprovecha los gases que emiten los residuos sólidos, como el metano, utilizado como combustible, a diferencia de la incineración emite menor cantidad de gases contaminantes. Entre otras alternativas tenemos a la incineración, pirolisis, termólisis de residuos. Además, se comprobó que las emisiones de carbono al realizar este reemplazo reducen considerablemente.

## **4.2 Conclusiones y Recomendaciones:**

### 4.2.1. Conclusión del objetivo general

Los residuos sólidos pueden sustituir a los combustibles fósiles como Combustibles Derivados de Residuos (CDR) o por sus siglas en inglés (RDF) Refuse derived fuel, siendo aplicable para tratamientos como el coprocesamiento, pirólisis, incineración y gasificación. Para lo cual se necesita una gestión previa de los residuos, análisis y manejo.

### 4.2.2. Conclusiones de los objetivos específicos

En este punto se va a responder los objetivos específicos de forma ordenada y objetiva en base a los conceptos e investigaciones encontradas y expuestas a lo largo de la investigación.

La situación actual del consumo de combustibles fósiles, muestra un desplazamiento creciente de la matriz energética en las industrias acostumbradas a utilizar carbón, petróleo y gas natural. Aún estamos lejos de disponer de una alternativa energética similar al petróleo y sus derivados, por otro lado, se dispone de toda una tecnología ligada al petróleo, que hace pensar que la transición al cambio aún tomará

muchos años. Además, al ser un elemento limitado conlleva una serie de preocupaciones, no sólo por las consecuencias ambientales sino también por los elevados costos que se manejan.

Se puede concluir que, realmente, la selección de residuos sólidos con alto poder calorífico depende en la mayoría de casos de la legislación de residuos sólidos que se realiza en cada país, pues las prioridades en la mayoría de casos es la reutilización y el reciclaje por lo que habría que disponer de la fracción restante. Sin embargo, se necesita saber de igual manera el poder calorífico de los residuos sólidos a utilizar, pues solo así sabremos qué cantidad se debe disponer para llegar a reemplazar la cantidad de combustible que se utilizaría en un proceso original.

Concluimos que la normativa que regula las emisiones está expresada en la Ley General del Ambiente, así como también, el último Decreto relacionado con los Límites máximos permisibles para plantas industriales de fabricación de cemento y/o cal, el cual es importante debido a que considera el tratamiento del coprocesamiento e impulsa y obliga a estas industrias a disminuir la contaminación normalmente generada. Así como esta normativa, mediante una mayor investigación por parte del MINAM se puede impulsar a otras industrias a disminuir el límite máximo permisible de emisiones con técnicas adecuadas según su sector.

La disposición de residuos se da de acuerdo a la legislación peruana en lo que refiere a gestión y tratamiento de residuos sólidos, sin embargo, es un tema que hay que reforzar bastante por parte del estado, pues aun no existen procesos sólidos, ni disposiciones por parte de empresas, debido a una falta de consolidación por ambos lados.

Entre los artículos e investigaciones observamos que los combustibles fósiles son vitales para el funcionamiento de diferentes procesos en diversas industrias, entre ellas se encontró al sector cementero, el cual utiliza el carbón para los hornos; el sector siderúrgico, eléctrico, como también industrias de cal y yeso.

Concluimos que es viable la sustitución de los combustibles fósiles por residuos sólidos, mediante diferentes tratamientos como la incineración, gasificación, pirolisis,

termólisis o coprocesamiento. Considerando la industria y sus respectivos procesos para la selección adecuada de los residuos sólidos que cumplan con las características o propiedades adecuadas.

#### 4.2.3. Recomendaciones

Al analizar las diferentes investigaciones pudimos notar que tanto la gestión de residuos como el tratamiento de los mismos son procesos ya utilizados en diversas partes del mundo, sin embargo, se observó que en nuestro país aún es un tema nuevo, ya que en el presente año recién se incorporaron regulaciones para el coprocesamiento en la industria cementera. Recomendamos tanto al estado, a los gobiernos regionales o a las municipalidades para que apliquen mejores medidas en cuanto a la gestión de los residuos sólidos, y a las empresas que investiguen más sobre estos procedimientos de aprovechamiento de energía de los residuos con un análisis de costo-beneficio.

Una correcta gestión de residuos conlleva un eficiente aprovechamiento de las industrias en el manejo de residuos sólidos. Se demostró que es un tema en el que todos debemos aportar, y recomendamos tanto a las empresas como ciudadanos que manejen una cultura ambiental con respecto a los residuos sólidos generados, que conozcan y apliquen una gestión adecuada cumpliendo de esta manera con una responsabilidad social y ambiental al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorando la calidad de vida.

## Bibliografía

- Arango, A., & Arroyave, O. (2016). Análisis de combustibles fósiles en el mercado de generación de energía eléctrica en Colombia: un contraste entre modelos de volatilidad. *Revista De Métodos Cuantitativos Para La Economía Y La Empresa*, 190-215.
- BBC. (13 de Octubre de 2013). *BBC NEWS*. Recuperado el 03 de Mayo de 2020, de BBC NEWS:  
[https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/10/130924\\_ciencia\\_especial\\_fracking\\_argentina\\_vs](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/10/130924_ciencia_especial_fracking_argentina_vs)
- Cáceres Graziani, L. (2002). *El Gas Natural*. Callao, Perú: Grupo SRL.
- Costa, C., Zapata, D., Lanz, A., Mora, J., Valencia, A., & Celis, L. (2017). Legislación Internacional aplicable a la valorización energética de los residuos y el coprocesamiento. *Aval Ambiental*.
- Diez, M., Álvarez, R., & Melendi, S. (2012). El proceso siderúrgico como vía de reciclado de residuos plásticos. *INCAR-CSIC*, 12-18.
- Durán, G. (2014). Fabricación de combustibles derivados de residuos (CDR) para la industria. *Gerencia Ambiental. La revista sobre Sustentabilidad Empresarial*, 7.
- ERFO. (31 de mayo de 2010). *SRF market views in Europe, International Workshop on Solid Recovered Fuel, Helsinki*,. Obtenido de  
<https://www.yumpu.com/en/document/read/5066076/international-workshop-on-solid-recovered-fuel-helsinki-31-erfo>
- Fenercon. (2010). Guía de valoración energética de residuos. *Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. Gráficas Arias Montano*.
- FICEM. (2017 ). Legislacion Internacional Aplicable a la Valorizacion Energética de los Residuos y el Coprocesamiento. *Aval Ambiental* , 8.
- Fundación CEMA. (2017). Recuperación energética de residuos en la Industria Cementera. 24.

- GTZ Gesellschaft für Technische. (2009). La alianza estratégica GTZ-Holcim para el coprocesamiento de residuos en la producción de cemento. 12.
- Hoornweg, D. y.-T. (2012). *What a waste: a global review of solid waste management, Urban development series knowledge*. Washintong DC.
- INEI. (2014). *Anuario de Estadísticas Ambientales*. Obtenido de [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1197/cap05.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1197/cap05.pdf)
- León D., E. F. (2006). La importancia del carbón mineral en el desarrollo. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 7.
- MINAM. (15 de Octubre de 2005). Obtenido de Ley General del Ambiente - Ley N°28611: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/06/ley-general-del-ambiente.pdf>
- MINAM. (2017). *Ley 27314 Ley General de Residuos Sólidos*. Obtenido de [https://www.municastilla.gob.pe/rentas2018/Ley\\_27314\\_Ley\\_General\\_de\\_Residuos\\_Solidos.pdf](https://www.municastilla.gob.pe/rentas2018/Ley_27314_Ley_General_de_Residuos_Solidos.pdf)
- MINAM. (enero de 2020). *Aprueban limites maximos permisibles para emisiones atmosfericas plantas industriales de fabricación de cemento y/o cal*. Obtenido de SINIA Sistema Nacional de Información Ambiental: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-limites-maximos-permisibles-emisiones-atmosfericas-plantas>
- MINEM. (2014). *MINEM*. Recuperado el 03 de Mayo de 2020, de MINEM: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/gasnatural.pdf>
- Montiel-Bohórquez, N., & Pérez, J. (2018). Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas para Optimizar el Desempeño de Centrales Térmicas.
- Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C., & Gross, T. (2017). Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos. *GIZ Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*, 7-51.
- OEFA. (2013). *Fiscalización Ambiental en Residuos Sólidos de gestión municipal provincial*. Obtenido de [https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=13926](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=13926)

- Puig, I., Jofra, M., & Calaf, M. (2012). La puerta de atrás de la incineración de residuos. *Greenpeace*, 62.
- Ramírez, F. C. (2014). *Potencial de Energía Calorífica de los Residuos Sólidos*. Cartagena: TEKNOS.
- Reyes, P. (1999). Combustibles, fósiles y contaminación. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*.
- Rojas, M. (2008). Perspectivas de procesamiento y uso del carbón mineral peruano. *Redalyc*, 231-250.
- Ruíz, J. A.-C. (2001). Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos. *SEMARNAT*.
- The World Bank. (1999). Municipal Solid Waste Incineration. *The International Bank for Reconstruction and Development, Washington, D.C.*
- UPME, U. d.-e. (2017). *Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia*. Colombia: Ministerio de Minas y Energía.
- Vázquez, J. (2008). *El mundo actual del petróleo*. Obtenido de [https://www.google.com/search?q=el+mundo+actual+del+petroleo+pdf&rlz=1C1GC EA\\_enPE851PE851&oq=el+mundo+&aqs=chrome.0.69i5912j69i57j4612j69i60j69i6112.2802j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=el+mundo+actual+del+petroleo+pdf&rlz=1C1GC EA_enPE851PE851&oq=el+mundo+&aqs=chrome.0.69i5912j69i57j4612j69i60j69i6112.2802j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8)



