

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Análisis de las tendencias en la incineración de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía a través de la información de las bases de datos.

Álvaro Emilio Barguil Díaz
Jorge Andrés Serna Higueta

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialización en Gestión de Sistemas Energéticos Industriales

Asesor(es)
Pedro Nel Alvarado Torres

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM
Facultad de Ingenierías

Departamento de Mecatrónica y Electromecánica
Medellín, Colombia
2021

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RESUMEN

La creciente generación y disposición de residuos sólidos urbanos RSU ha sido una problemática a nivel mundial. Algunos de los RSU producidos son reutilizados y valorizados energéticamente bajo diferentes métodos, mientras que los que no son aprovechados generan altos niveles de contaminación y más aún cuando su disposición final directa son los vertederos, contaminando los recursos hídricos, malos olores en el entorno y afectando el aire por medio de gases de efecto invernadero GEI.

Uno de los métodos más comunes en el tratamiento de los RSU en países desarrollados es la incineración que permite la gestión y valorización energéticas de los residuos sólidos. En sus inicios fue utilizado solo para la reducción de volúmenes y eliminación de bacterias que afectaban la salud pública, con el tiempo se notó la oportunidad de recuperar energía debido a su alta capacidad térmica, llegando a ser catalogado en algunos países como fuente de energía alternativa.

El objetivo principal del proyecto fue revisar y analizar las tendencias en la incineración de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía bajo criterios de eficiencia y control de las emisiones de gases al ambiente, mediante la revisión de artículos en bases de datos científicas. Para su alcance se planteó una serie de objetivos específicos que a su vez dan paso a la metodología planteada, tales objetivos abarcan desde los principios fisicoquímicos en la incineración, parámetros de operación, identificar de las tendencias y examinar los criterios de eficiencia y sistemas de control de emisiones.

Las tendencias en la incineración RSU han mejorado significativamente los procesos en los sistemas de combustión permitiendo mejorar su rendimiento energético para cumplir con estándares de eficiencia y modernos sistemas control de emisiones que reducen las emisiones de gases altamente nocivos producto de la combustión garantizado cumplimiento a normativas ambientales.

Palabras claves: Incineración de RSU, recuperación de energía, valorización energética, tendencias en incineración de RSU, sistemas APC y eficiencia.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias, profesores, compañeros y amigos, los cuales nos brindaron esa fortaleza y motivación para no desfallecer en momentos difíciles y poder alcanzar un logro más para nuestras vidas. Damos las gracias infinitas a los profesores Pedro Nel Alvarado Torres, María Vilma García Buitrago y Miryam Lucía Guerra Mazo por dedicar parte de su tiempo en el desarrollo de nuestro proyecto de grado, el cual mejorará nuestra calidad de vida.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ACRÓNIMOS

- RSU:** residuos sólidos urbanos
- GEI:** gases de efecto invernadero
- CHP:** cogeneración
- RDF:** combustible derivado del residuo
- APC:** sistema de control de gases
- ORC:** ciclo Orgánico Rankine
- NCV:** poder calorífico neto
- SCR:** reducción catalítica selectiva
- SNCR:** reducción selectiva no catalítica
- HRSG:** caldera de recuperación de calor

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	OBJETIVO GENERAL.....	9
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3.	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	10
3	METODOLOGÍA.....	20
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
4.1	Fenomenología en los procesos de incineración RSU	23
4.1.1	Factores relevantes en el proceso combustión.	24
4.1.2	Relación aire-combustible	24
4.1.3	Características de los RSU	25
4.1.4	Parámetros de operación.	29
4.1.5	Emisión de gases..... ¡Error! Marcador no definido.	
4.2	Nuevas tendencias en la incineración RSU.....	32
4.2.1	Sistemas híbridos	32
4.2.1.1	Incinerador RSU y ciclos de turbina de gas	32
4.2.1.2	Incinerador RSU y Ciclo Orgánico Rankine ORC.....	34
4.2.2	Co-combustión RSU	35
4.2.2.1	Co- combustión RSU y carbón para la reducción de las emisiones	35
4.2.2.2	Co-combustión RSU, residuos de carbón y residuos de petróleo.....	36
4.2.3	Recuperación de calor	38
4.2.3.1	Aprovechamiento de calor residual para el pretratamiento de los RSU	38
4.2.3.2	Pre calentamiento del aire primario con calor residual	40
4.2.4	Oxi-combustión.....	41
4.2.4.1	Oxi-combustión en incinerador RSU	41
4.3	Eficiencia y control de gases.....	43
4.3.1	ASME PTC 34	44

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4.3.2	Directiva 2008/98/CE Formula R1 de eficiencia	45
4.3.3	Control de emisión de gases.....	49
4.3.3.1	Control de polución de aire APC	51
4.3.3.1.1	Reducción de polvo y gases ácidos	52
4.3.3.1.2	Reducción de óxidos de nitrógeno y dioxinas.....	52
5	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES.....	54
6	TRABAJO FUTURO	55
	REFERENCIAS	56
	ANEXOS.....	58

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1. INTRODUCCIÓN

La incineración RSU es un método integral que además de la gestión para la eliminación de residuos sólidos permite obtener energía ya que el método presenta alto contenido energético en forma de calor y en algunos casos es valorizado como fuente energética según la capacidad de recuperación en plantas de incineración RSU. La eficiencia en la recuperación de energía y los sistemas de control de emisión de gases son parámetros fundamentales y en la actualidad estos parámetros permiten determinar el rendimiento del proceso, cumpliendo de estándares y normativas que rigen estos sistemas

Por medio de la actual monografía se pretende compilar información de las actuales investigaciones en los procesos de incineración RSU con recuperación de energía para generar conocimiento y los resultados puedan ser utilizados en nuevas investigaciones e incluso en aplicaciones para nuevos desarrollos garantizando a estos sistemas un mejor rendimiento por medio de la eficiencia y sistemas modernos para el control en las emisiones de gases cumplimiento de normativas ambientales.

En esta investigación se revisaron y analizaron las tendencias en los procesos de incineración de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía teniendo en cuenta estándares de eficiencia y sistemas modernos que permiten el control de las emisiones de gases al ambiente cumpliendo las normativas ambientales. La valorización energética en la incineración de los RSU durante los últimos años ha presentado interés en nuevos estudios lo que ha generado importantes avances tecnológicos y mayor rendimiento en los procesos de combustión, recuperación de energía y en los sistemas de control de emisión de gases.

La investigación se desarrolló en 3 objetivos específicos, en el primero se realiza un estudio profundo en las bases de datos científicas sobre la incineración RSU, la fenomenología en la transformación de los residuos sólidos urbanos en energía térmica, funcionamiento, tipos de incineradores y sus avances en el tiempo, composición y pretratamientos de RSU, parámetros de proceso y postratamiento para las emisiones de gases.

En la segunda parte se realizó una identificación en la literatura de las tendencias en los procesos de incineradores RSU. Entre las tendencias revisadas encontraron sistemas híbridos, co-combustión, sistemas de recuperación de calor residual y oxi-combustión que

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

permiten mejorar el proceso de la combustión con mayor rendimiento energético y una reducción en la emisión de gases contaminantes al ambiente.

En la tercera parte se examinó los criterios de eficiencia y los sistemas modernos en la limpieza de los gases para cumplir con las normas de emisión de aire. Para la eficiencia se revisaron la normativa ASME PTC 43 y la Directiva 2008/98/CE Formula R1 utilizadas en la valorización energética de los residuos sólidos para cuantificar la cantidad de energía contenida, producida y utilizada en las plantas de incineración RSU y además de cuantificar y mejorar el rendimiento energético también permite determinar si se encuentra en los niveles establecidos por la norma Formula R1. Para los sistemas de limpieza de los gases se revisaron métodos para la reducción de polvo, gases ácidos de óxidos de nitrógeno y dioxinas utilizados en las plantas de incineración RSU para el de control de gases cumpliendo con criterios ambientales.

Para terminar, se presentan una serie de conclusiones y estudios futuros obtenido a lo largo de la investigación, que fortalecerán el conocimiento sobre la incineración como fuente de energía alternativa, las tendencias utilizadas en estos procesos que garantizan mayor rendimiento y una futura implementación de estos sistemas en Colombia.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2. OBJETIVO GENERAL

Analizar las tendencias en la incineración de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía bajo criterios de eficiencia y control de las emisiones de gases al ambiente, mediante la revisión de artículos en bases de datos científicas.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar y sintetizar en la literatura científica, los principios fisicoquímicos y los parámetros de operación en la incineración de residuos sólidos urbanos.
- Identificar las tendencias en los procesos de incineración de residuos sólidos urbanos.
- Examinar la eficiencia energética y los sistemas de control modernos de emisión de gases en los procesos de incineración de residuos sólidos urbanos.

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Incineración de Residuos Sólidos Urbanos

La incineración de Residuos Sólidos Urbanos RSU es un proceso termoquímico que consiste en el secado, pirolisis, oxidación y reducción de los residuos, generando como producto gases a alta temperatura y como subproducto cenizas con algún contenido de carbón inquemado como se puede observar en la Figura 1. Los gases a alta temperaturas son aplicados en sistemas de calderas, donde el agua de alimentación de la caldera se calienta para formar vapor saturado y vapor seco para ser aprovechados energéticamente en forma calor y/o mediante un proceso de generación de electricidad.

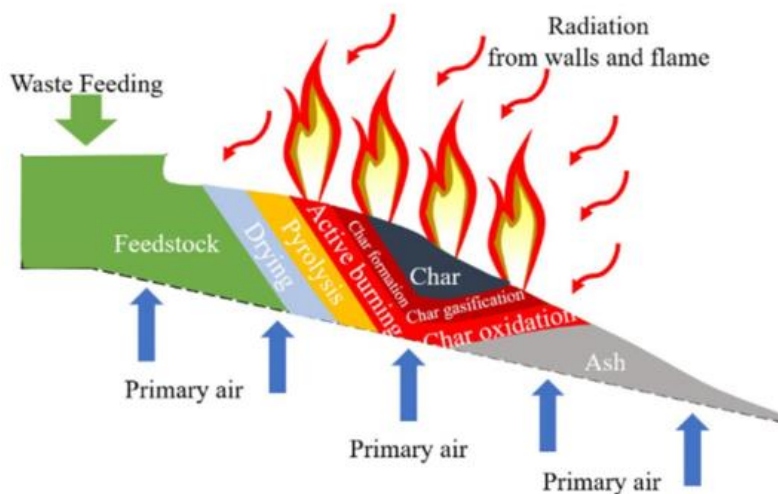


Figura 1. Diagrama del proceso termoquímico en la incineración de RSU (Yan et al., 2021)

Por lo general, los materiales orgánicos que se recuperan de los residuos tienen depósitos considerables de energía, de los cuales entre el 65% y el 80% se puede aprovechar para generar calor y desplegarlo para distritos térmicos. Se dice que el nivel de eficiencia del proceso de incineración es de alrededor de 25 – 30% y puede estar determinado en gran medida por la composición los residuos que pueden ser muy heterogéneos. (AlQattan et al., 2018)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Generalmente, el método de incineración de RSU se clasifican en dos: el combustible derivado de residuos y el quemado en masa. La principal diferencia entre los dos es que la quema en masa se somete a poco o ningún procesamiento previo de los residuos antes de la incineración, mientras que el combustible derivado de residuos se somete a un procesamiento previo al clasificar cuidadosamente los materiales con bajo poder calorífico y bajo contenido calórico, como el vidrio y los metales. (AlQattan et al., 2018)

2.2 Historia

Los primeros incineradores fueron desarrollados para la gestión del manejo de los RSU con el fin de reducir los volúmenes y eliminar las bacterias para la prevención de enfermedades. En la primera mitad de siglo XX en Europa empezaron a adoptar la recuperación de calor en los incineradores para el suministro de agua caliente, para la calefacción domestica e industrial, la desalinización de agua de mar para el suministro de agua potable a los hogares de las zonas costeras, entre otros. A mitad de siglo XX en Paris, Francia y en EEUU se construyeron los primeros incineradores con el propósito de generar vapor y electricidad debido a los aumentos del precio del petróleo para esa época. (Makarichi et al., 2018)

Inicialmente, los incineradores fueron clasificados de alimentación continua, alimentación por lotes, alimentación por pistón, metal cónico y de recuperación de calor residual. Los de alimentación continua tenían capacidad de manejar mayores cantidades de residuos de manera continua en los que se agrupaban los incineradores de parrilla móvil, alternativos, hornos rotativos y de parrilla de barril. Los de alimentación por lotes operaban por intervalos periódicos permitiendo que el lote ingresado de residuos se quemara completamente donde se encuentran los incineradores metal cónico y de pistón. (Makarichi et al., 2018)

A continuación, se puede observar un resumen en la evolución de los incineradores en el tiempo. Figura 2.

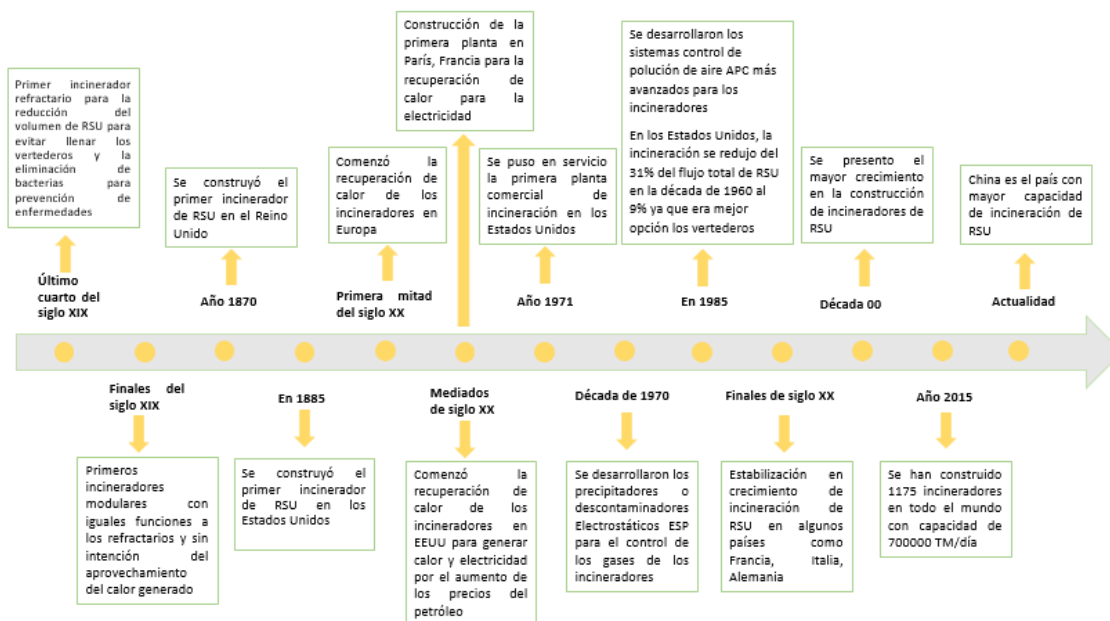


Figura 2. Evolución de los incineradores en el tiempo

Los incineradores de recuperación de calor fueron diseñados con mecanismo únicamente para el aprovechamiento térmico, mientras que los demás fueron diseñados para la reducción de los RSU. Durante los años los incineradores han presentado avances significativos en sus diseños, con la necesidad de mejorar la eficiencia en la combustión y nuevos desarrollos más sofisticados en los sistemas de pretratamiento de la materia prima y en el postratamiento de los gases. (Makarichi et al., 2018)

En la actualidad solo los incineradores de alimentación continua se mantuvieron en el tiempo clasificados como: incineradores de parrilla móvil, horno rotatorio e incineradores de lecho fluidizado. (Makarichi et al., 2018)

2.3 Sistemas de incineración RSU

La incineración es un proceso termoquímico donde se queman los residuos y es utilizado en la gestión integral de los residuos sólidos que permite combinarlo con la recuperación de energía en forma de calor para la generación de energía eléctrica y/o térmica. (AlQattan et al., 2018). Los incineradores modernos han desarrollado mejoras en los sistemas de combustión que permiten aumentar su eficiencia y en los sistemas de control de gases que permiten mitigar y limpiar los gases contaminantes del proceso de

combustión que se emiten a la atmosfera por medio de la chimenea. (Mondal & Yadav, 2018). En la Figura 3 se representa un esquema simplificado de un incinerador en una planta de RSU. A continuación, se muestran los tipos de plantas para la quema de desechos.

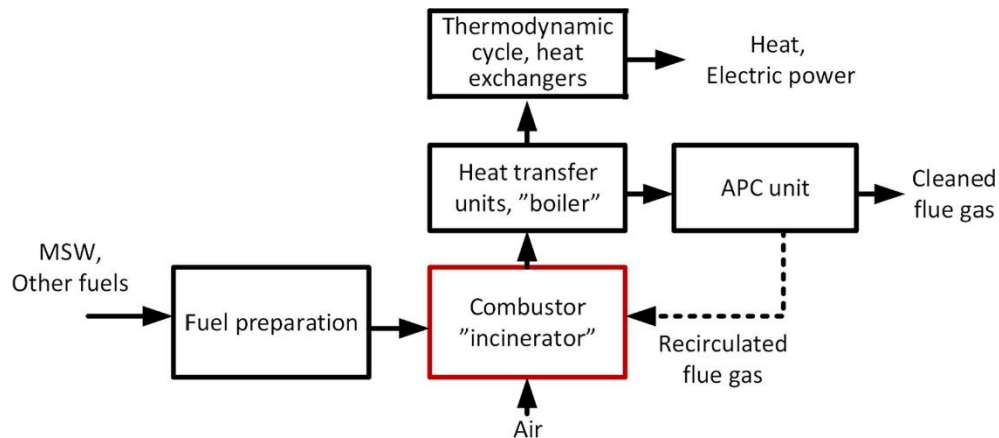


Figura 3. Esquema de un incinerador en una planta de RSU (Leckner & Lind, 2020)

2.3.1 Parrilla o Parrillas Móviles

La parrilla móvil es un sistema que permite el movimiento y transporte de los RSU hacia la cámara de combustión para permitir una combustión más eficiente y completa. Una sola planta de este tipo puede tomar en promedio 35 toneladas métricas de desechos cada hora para su tratamiento. Los residuos son ingresados por medio de una grúa a través de la tolva en un extremo de la rejilla, donde se mueven y se transporta sobre la rejilla descendente hasta el pozo de cenizas en el otro extremo. Aquí las cenizas se eliminan a través de una esclusa. El aire de combustión primario ingresa a través de las rejillas desde la parte inferior y parte de ese aire es utilizado para enfriar la propia parrilla con el propósito de restaurar la resistencia mecánica. El aire de combustión secundario pasa a la caldera a alta velocidad a través de boquillas sobre la parrilla para mejorar la combustión asegurando un exceso de oxígeno como se muestra en la Figura 4. (Mondal & Yadav, 2018)

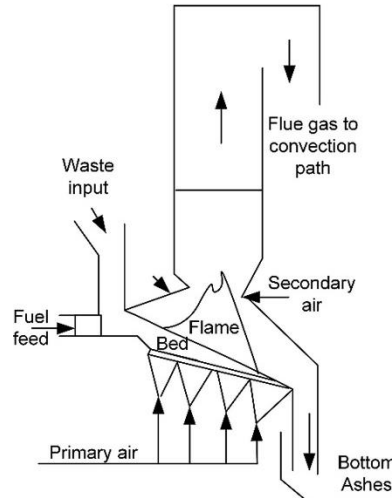


Figura 4. Incinerador de parrilla móvil (Leckner & Lind, 2020)

2.3.2 Horno Rotatorio

Los incineradores de horno rotatorio son adecuados para grandes plantas industriales. En la Figura 5, se muestra el diseño del incinerador que tiene dos cámaras, cámara primaria y cámara secundaria. La cámara primaria consta de un tubo cilíndrico levemente inclinado que gira sobre su eje revestido de material refractario. El revestimiento refractario interno se proporciona como una capa para proteger la estructura del horno que debe reemplazarse con cierta frecuencia dependiendo su estado. (Mondal & Yadav, 2018)

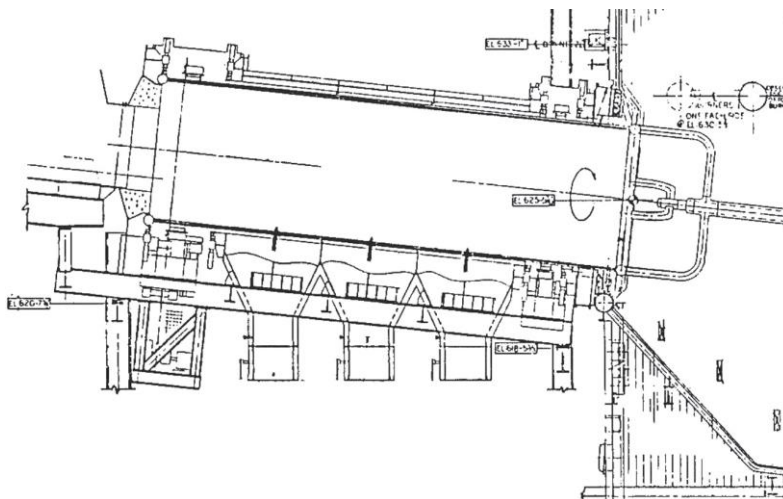


Figura 5. Incinerador horno rotatorio (Mondal & Yadav, 2018)

2.3.3 Lecho fluidizado

Hay dos tipos comunes de incineradores RSU de lecho fluidizado: lecho fluidizado circulante utilizado para la incineración de biomasa y lecho fluidizado no circulante (burbujeantes) para la incineración de varios combustibles con capacidades hasta de $10 \text{ Ton}/h$ como se muestra en la Figura 6 de derecha a izquierda respectivamente. (Leckner & Lind, 2020)

En el lecho fluidizado hay un lecho de material inerte con el que se fluidiza en la sección inferior de la cámara de combustión al que se alimentan constantemente de residuos. El aire que fluye constantemente debajo de la cámara permite que los desechos se mantengan en movimiento, para asegurar una combustión más completa. (Mondal & Yadav, 2018)

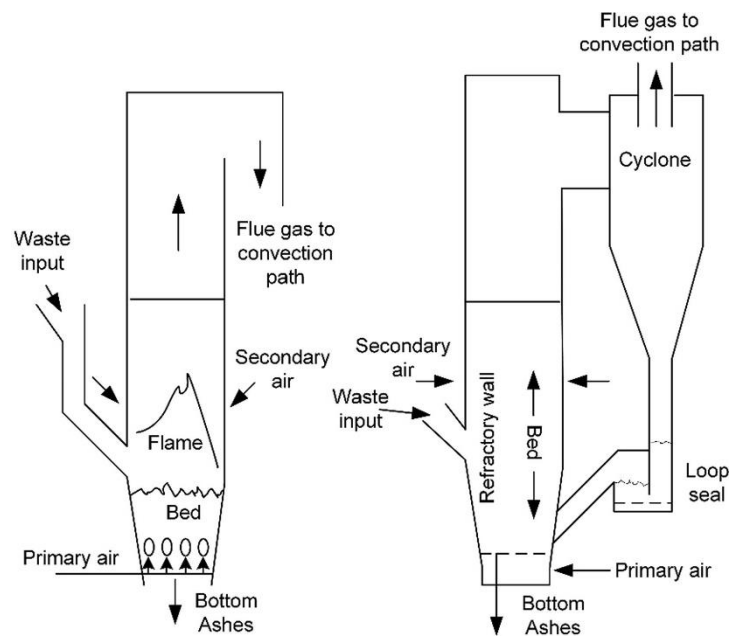


Figura 6. Incineradores de lecho fluidizado circulante y no circulante (Leckner & Lind, 2020).

2.4 Proceso de incineración de RSU

se realizará una descripción más detallada del sistema más común el cuál es la incineración RSU en parrilla móvil. Los residuos son ingresados por medio de grúas a la entrada de residuos (1) en un extremo del incinerador en la Figura 7, luego caen a la rejilla (2) e inician el proceso termoquímico desplazándose sobre la rejilla de manera descendente hacia pozo de cenizas (7). Las rejillas suelen estar inclinadas entre 10° y 25° sobre el eje horizontal. (Leckner & Lind, 2020). El aire primario en el incinerador ingresa desde la parte inferior de la rejilla móvil (4) en secciones independientes para adaptarse a las fases de conversión: secado, pirolisis, oxidación y reducción de los residuos. El aire además de ser utilizado como comburente, también es usado para enfriar la propia parrilla con el propósito de restaurar la resistencia mecánica de las rejillas con apoyo de sistemas de refrigeración con agua internamente. (Mondal & Yadav, 2018). El aire de combustión secundario pasa a la caldera a alta velocidad a través de boquillas sobre la parrilla para que haya suficiente oxígeno y se garantice una combustión completa y generar una mezcla adecuada en los gases de combustión. Las cenizas son descargadas a un sistema húmedo controlando la temperatura y la generación de polvo. (Rogoff & Screve, 2011)

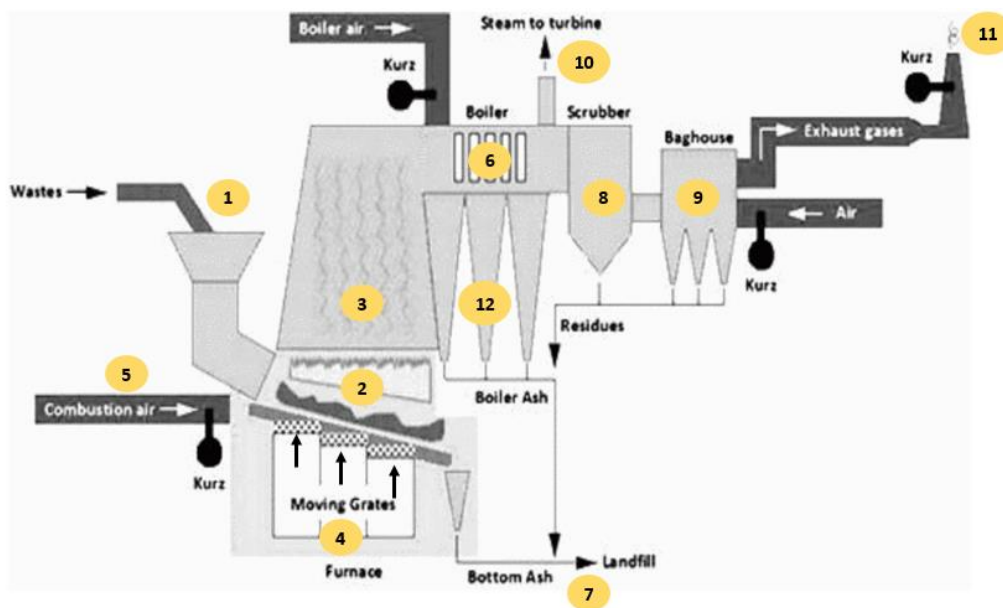


Figura 7. Proceso de una planta de incineración de RSU (Mondal & Yadav, 2018).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Durante el proceso de combustión los gases son calentados a temperaturas de aproximadamente 980 °C (3) y se desplazan desde el horno hasta a través de la sección del tubo de la caldera (6), donde el agua contenida se calienta para generar vapor saturado y vapor seco, aprovechados energéticamente en calor y mediante un proceso de generación de electricidad (10). Los gases son tratados con economizadores y con dispositivos de control de aire como precipitadores electrostáticos, cámara de filtros o depurador de gases (8, 9 y 12) que permiten mitigar y limpiar los gases contaminantes del proceso de combustión que se emiten a la atmosfera por medio de la chimenea (11). (Rogoff & Screve, 2011)

2.4.1 Incineración RSU a nivel mundial.

La incineración de RSU para la recuperación de energía es una de las formas más atractiva y maduras en todo el mundo y más aún cuando son integradas ampliamente a los modelos de la gestión de los residuos y sus características varían según los niveles de avance entre países y además de la caracterización del tipo los RSU. (AlQattan et al., 2018). En la siguiente Figura 8, se representa el crecimiento en la capacidad de incineración después de mitad del siglo XX y una estabilidad en crecimiento precisamente a finales del siglo XX en algunos países como Francia, Alemania, Italia, Países bajos debido a que estos países han encontrado una capacidad de incineración suficiente en relación con la cantidad de RSU generados y unas estrictas políticas para la emisión de gases y por tal razón sus controles son más costosos. Por otro lado, China incrementa su capacidad de incineración y en la actualidad es el país con mayor capacidad. (Lu et al., 2017)

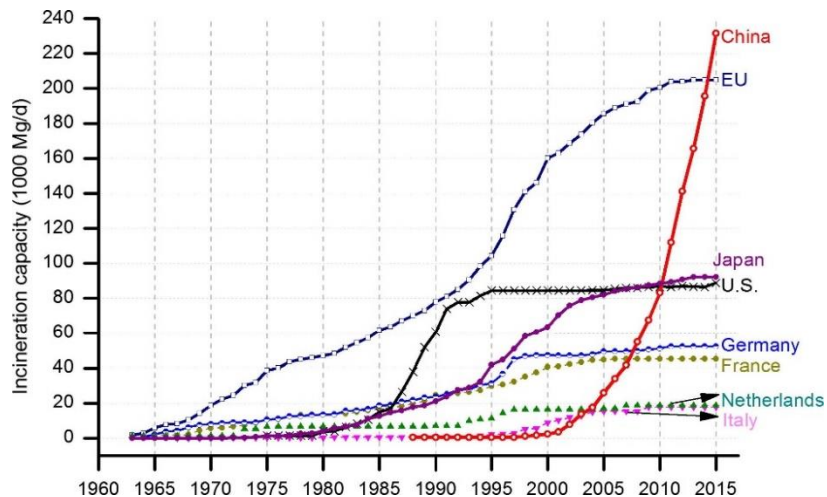


Figura 8. Capacidad de incineración en función del tiempo (Lu et al., 2017)

En la Figura 9, se puede apreciar que Dinamarca, Suecia, Estonia y Finlandia parecen estar entre los países líderes en la incineración de RSU, incinerando al menos el 50% de sus RSU. En consecuencia, han reducido los vertederos a menos del 10% de los RSU generados. En el este de Asia, Japón es igualmente un país competitivo y el 67% de los 65 millones de toneladas de RSU generados al año en Japón se tratan térmicamente. En 2013, Japón

tenía 1172 plantas de tratamiento térmico de RSU con capacidad para procesar 182.683 Ton/día. (Makarichi et al., 2018)

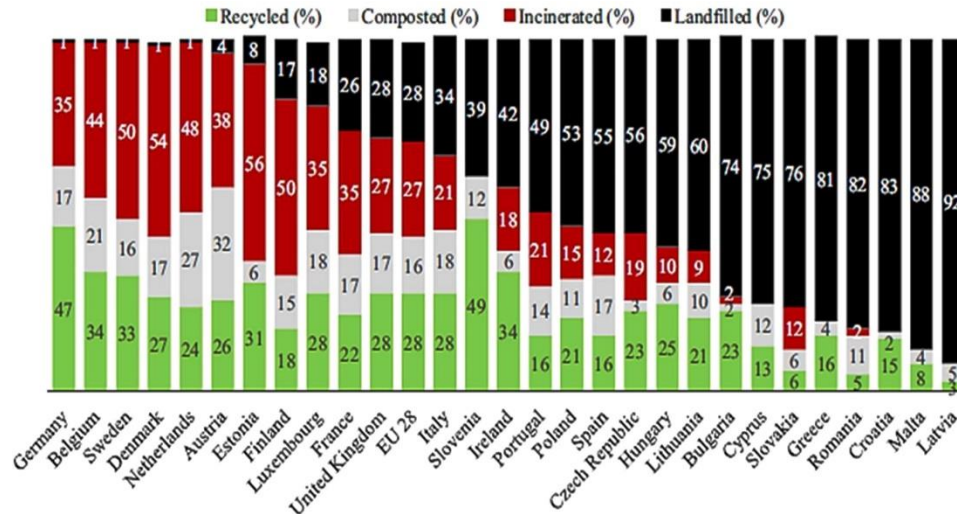


Figura 9. Capacidad de incineración por países (Makarichi et al., 2018)

En el caso de América Latina Brasil representa a la región con la capacidad de incinerar para el aprovechamiento de energía alrededor de 600 toneladas métricas por día. Muchos países africanos y latinoamericanos también incineran para inertizar los residuos médicos y peligrosos, aunque sin recuperación de energía. (Makarichi et al., 2018)

Como se ha visto, la incineración de RSU es un proceso muy antiguo y tradicional en países desarrollados, los métodos utilizados en este tratamiento han sido los mismos durante los últimos tiempos como lo son el horno rotatorio, lecho fluidizado y parrilla móvil, sin embargo, el sistema más común en la incineración RSU es la parrilla móvil ya que permite mayor capacidad de incineración, mayor potencial térmico y mayor provecho en la recuperación de energía garantizando cumplimiento a los estándares ambientales. En las últimas décadas se ha desarrollado sistemas modernos, que han mejorado el rendimiento en los procesos y la eficiencia en la recuperación de energía y de control en la emisión de gases. En el mundo, China es el país con mayor capacidad de incineración de RSU mientras que para América Latina, Brasil es el que representa a la región con una mayor capacidad de tratamiento con recuperación de energía.

A continuación, se dará a conocer la metodología y la estructura planteada durante el desarrollo del proyecto.

3 METODOLOGÍA

Este proyecto se desarrolló bajo el tipo de investigación aplicada tecnológica, ya que este tipo de investigación sirve para generar conocimiento y sus resultados pueden ser utilizados en el sector productivo. Para su elaboración se realizó por medio de la siguiente estructura como se muestra a continuación. Figura 10.

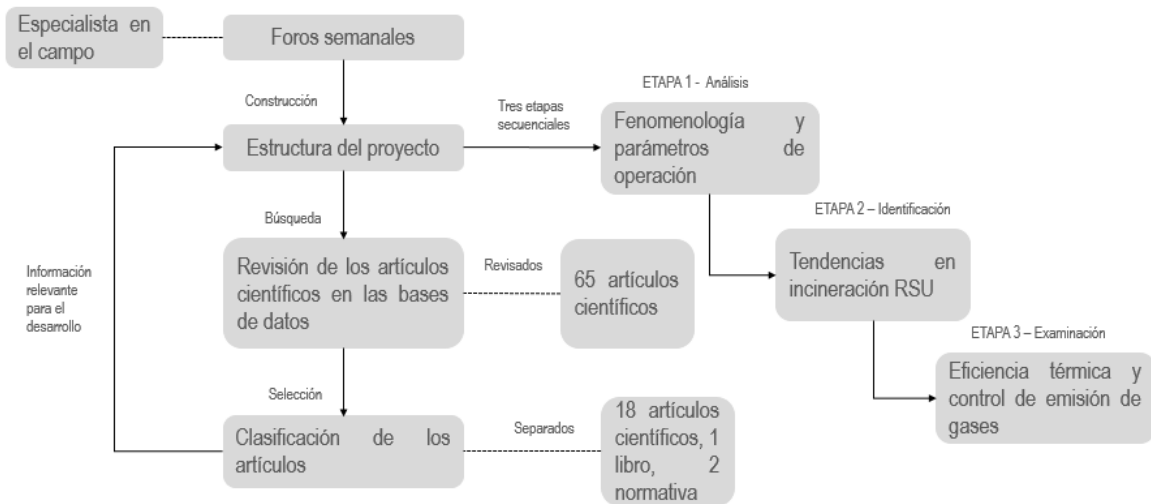


Figura 10. Diagrama de la metodología

Durante el desarrollo, se programaron foros semanales con un especialista en el campo, donde inicialmente se empezó a armar una estructura para el desarrollo del proyecto y con base a esa información se inició con la consulta y revisión de los artículos científicos en las bases de datos e información de otros medios de la Internet. En los foros se revisaban entre 12 y 15 artículos por sección, además de libros e información encontrada en diferentes medios entre los participantes, en total se revisaron aproximadamente 65 artículos científicos relacionados con el tema de incineración de RSU, de los cuales 23 contenían información relevante, teniendo en cuenta la estructura definida de la investigación.

En la información encontrada se seleccionaron artículos que contenían información importante y novedosa como los avances, la fenomenología, parámetros de procesos, caracterización de los RSU, postratamiento de gases y tendencias en los sistemas de incineración como sistemas de cogeneración CHP, recuperación de calor, híbridos y co-combustión. Los artículos revisados que fueron excluidos contenían planteamientos

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

similares con respecto a los artículos seleccionados y otros no contenían información relacionada con la estructura definida de la investigación.

En la primera etapa se realizó un estudio profundo sobre la fenomenología en la transformación de los residuos sólidos urbanos en energía, los avances de los incineradores en el tiempo, además todo lo relacionado a su funcionamiento, parámetros de proceso, caracterización y pretratamiento de los RSU y el postratamiento en los gases de los incineradores RSU, por medio de las bases de datos científicas.

Se revisaron parámetros de operación para los incinerados RSU más comunes, como lo son incineradores de parrilla móvil y de lecho fluidizado, determinando cuales son los más adecuados y las características fisicoquímicas que debe tener un proceso de incineración RSU, la clasificación de los RSU teniendo en cuenta su humedad y el poder calorífico, ya que como combustible primario se pueden determinar parámetros operativos relacionados en eficiencia y control de los gases.

En la segunda etapa, se identificaron las diferentes técnicas y tecnologías en los incineradores RSU utilizadas en la actualidad y las tendencias en los procesos de incineración como fuente de energía.

Por medio de la revisión de la literatura referente se encontró varios tipos de incineradores RSU, los cuales se clasifican en: Parrilla móvil, lecho fluidizado, horno rotativo (entre otros). Dependiendo del tipo de incinerador se tienen diferentes parámetros de operación, como el potencial térmico, eficiencia y control de gases. Se revisaron y se describieron tendencias en los sistemas de incineración como la cogeneración de electricidad y calor, co-combustión para mejorar el poder calorífico de los RSU con adición de otros combustibles como el carbón y sistemas híbridos con turbina de gas y ciclos Rankine por medio de calderas de recuperación de calor.

Para la tercera etapa, se examinó en la literatura seleccionada la eficiencia de las diferentes técnicas y tecnologías en los sistemas de incineración RSU comparando los criterios de operación y control de las variables de proceso en el pretratamiento de los residuos y el pos-tratamiento de los gases, validando que sistemas presentaron el mayor aprovechamiento energético, dando cumplimiento a los parámetros de operación estipulados en normativas ambientales.

Finalmente, por medio del conocimiento adquirido, el asesoramiento especializado por personal experto e información encontrada de sistemas de incineración RSU se concluye

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

sobre los pro y los contras para la implementación de estos sistemas con un aprovechamiento de energía, contemplando el potencial energético que pueden suministrar y actualmente no es utilizado como en otros países que han implementado esta técnica, aportando a la diversificación en la generación energética y contribuyendo en la mitigación a la contaminación ambiental.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Fenomenología en los procesos de incineración RSU

La incineración RSU es un proceso termoquímico que consiste en el secado, pirolisis, oxidación y reducción de los residuos, generando como producto gases a alta temperatura que contiene dióxido de carbono, agua, oxígeno, nitrógeno y como subproducto las cenizas para una combustión completa. En la práctica la composición de los RSU es heterogénea y contiene sustancias que impactan al ambiente como el nitrógeno que se convierte en óxidos de nitrógeno NO_x , el azufre que cuando está presente también se convierte en óxidos de azufre SO_x , los metales como el hierro y el aluminio que también se pueden convertir a óxidos y el cloro a HCl . Figura 11. (Cheremisinoff, 1992)

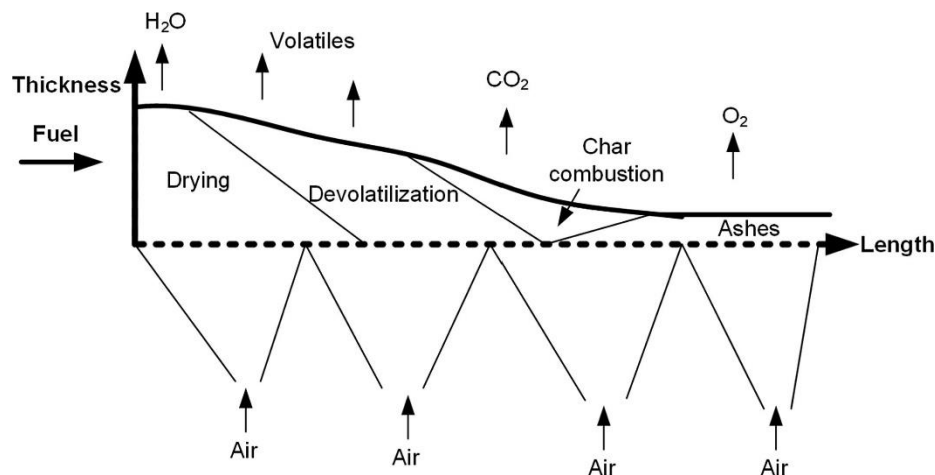


Figura 11. Proceso simplificado de conversión química de un incinerador RSU (Leckner & Lind, 2020)

La combustión es un proceso desarrollado a alta temperatura (superior a 800 °C) donde se libera el calor contenido en los residuos y es parcialmente transferido por conducción, convección y radiación tanto a las paredes del incinerador como al combustible (residuos) que entran para la ignición y parte del calor residual del proceso es aprovechado energéticamente.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4.1.1 Factores relevantes en el proceso combustión.

Los sistemas de incineración RSU debe diseñarse teniendo en cuenta factores importantes para la combustión como tiempo, temperatura y turbulencia. (Cheremisinoff, 1992)

- **Tiempo:** es contabilizado para garantizar una combustión completa de los residuos, gases volátiles a través del espacio y volumen en la cámara de combustión.
- **Temperatura:** el calor liberado es fundamental para sostener la combustión. En ocasiones es necesario suministrar calor con quemadores auxiliares para el precalentamiento de los incineradores y del combustible con bajo poder calorífico y altos niveles de humedad
- **Turbulencia con presencia de oxígeno:** la hidrodinámica permite tener una combustión eficiente y su propósito es promover la mezcla entre los residuos combustibles y el comburente.

Otros aspectos para revisar que tienen influencia en el proceso de incineración RSU es la relación aire combustible y la caracterización de los residuos sólidos descritos a continuación.

4.1.2 Relación aire-combustible

Para una combustión eficiente es necesario que el combustible y el aire se mezclen en proporciones y condiciones adecuadas que aceleren la ignición y mantenga la combustión. Para la incineración RSU por la variabilidad de las propiedades fisicoquímicas se dificulta mantener la mezcla para garantizar una combustión adecuada y eficiente. Teniendo en cuenta el movimiento relativo del aire combustible y el calor resultante producto de la combustión, la cámara de combustión puede clasificarse de la siguiente manera. (Cheremisinoff, 1992)

- La alimentación en la cámara de combustión el combustible y aire fluyen en la misma dirección.
- La alimentación en la cámara de combustión, el combustible y aire fluyen en direcciones opuestas como se muestra en la Figura 12(a) y la Figura 12(b) muestra el producto del calor y composición de la combustión.
- La alimentación en la cámara de combustión el combustible y aire fluyen en direcciones angulares, contrario a las dos configuraciones anteriores.

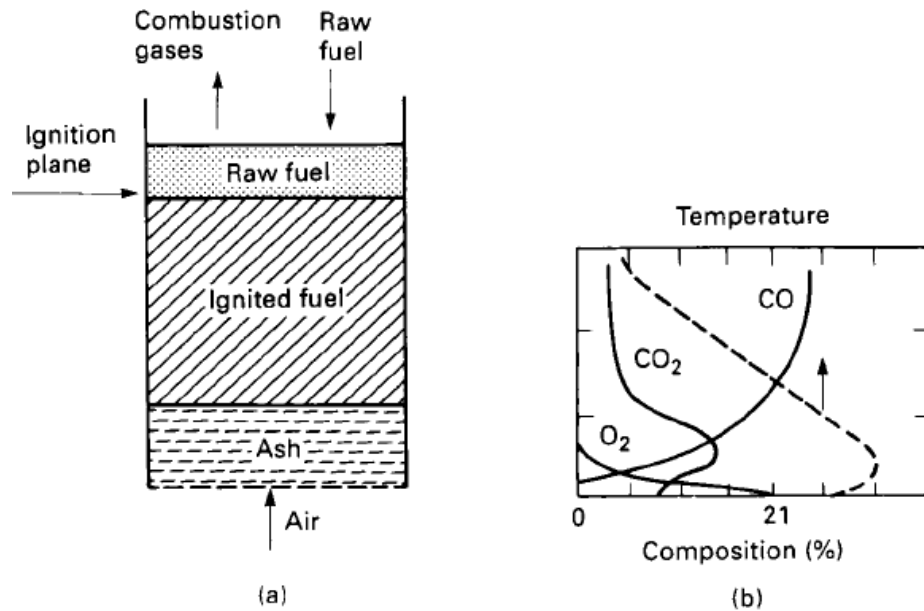


Figura 12. Relación aire-combustible en direcciones opuestas. (Cheremisinoff, 1992)

4.1.3 Características de los RSU

Las características de los RSU dependen de su origen y del desarrollo de una sociedad. Los países menos desarrollados tienden a tener una mayor proporción de desechos orgánicos biodegradables que los países económicamente más desarrollados. En la siguiente Figura 13 se puede observar los porcentajes de composición en la generación de residuos en poblaciones según su nivel socioeconómico. (Makarichi et al., 2018)

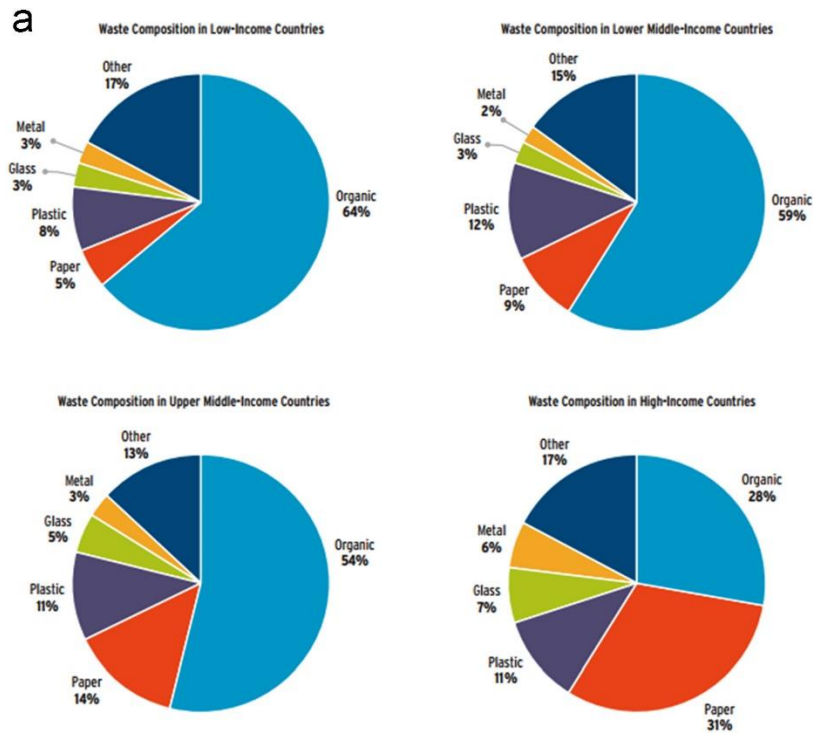


Figura 13. Características de los RSU a nivel socioeconómico. (Makarichi et al., 2018)

En la incineración RSU, los residuos sólidos como combustible en la incineración es clasificada en dos:

- Combustible derivado de residuo RDF
- Quemado en masa

El quemado en masa se somete a poco o ningún procesamiento previo de los residuos antes de la incineración, mientras que el combustible derivado de residuos (RDF) se somete a un procesamiento previo al clasificar, separar los materiales inertes, que son aquellos que contienen bajo poder calorífico, como el vidrio y los metales. (AlQattan et al., 2018). En la Figura 14 se observa el ciclo de residuos sólidos bajo el método de RDF con el propósito de procesar y segregar los materiales desde el punto de vista energético, separando los residuos combustibles, ceniza e inertes y material orgánico fermentable. (Elias, 2005)

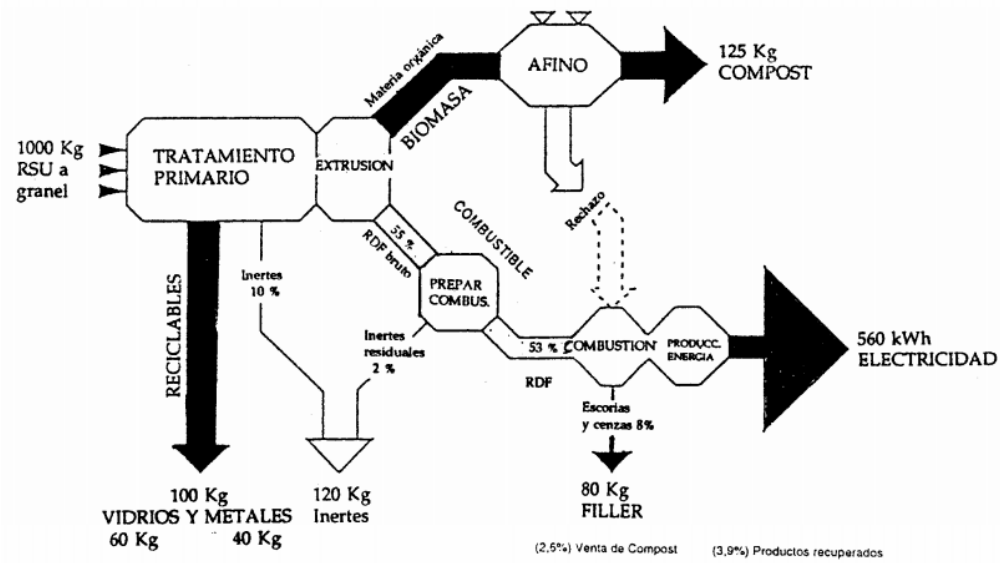


Figura 14. Proceso de tratamiento RDF. (Elias, 2005)

Generalmente, los RSU son extremadamente diversos en su composición, lo que a su vez determina el poder calorífico y directamente su combustibilidad en la incineración RSU. En la Tabla 1, se indica de manera general el poder calorífico (PCI) que tienen la composición de los residuos. Como se observa, los combustibles con mayor poder calorífico relacionados son los que aporta la energía para el tratamiento térmicos, de allí la importancia de realizar la clasificación de los componentes.

Tabla 1. Características de combustibilidad de RSU. (Leckner & Lind, 2020)

Componente	Humedad (sin tratamiento) [%]	Ceniza (sin tratamiento) [%]	Volátiles (seco y sin cenizas) [%]	PCI (MJ / kg)
Comida	64	5	78	3
Desechos de jardín	38	5	94	6,7
Devolver papel	24	6	93	15,0
Paquetes de papel	24	5	93	10,6
Plástica	14	10	88	31,5
Vidrio	3	97	0	0
Metal	7	93	0	0
Otros combustibles	20	10	97	16,3
Otros no combustibles	-	100	0	0
Promedio aproximado	30-40	20-25	90	10

El contenido de humedad es uno de los parámetros más difíciles en los sistemas de incineración RSU, ya que aumenta el peso de los residuos sin incrementar el rendimiento energético neto que se puede obtener del tratamiento térmico de los residuos. Los combustibles RDF deberían estar secos. La Figura 15 muestra la variación del poder calífico inferior en función de la humedad del combustible. (Elias, 2005)

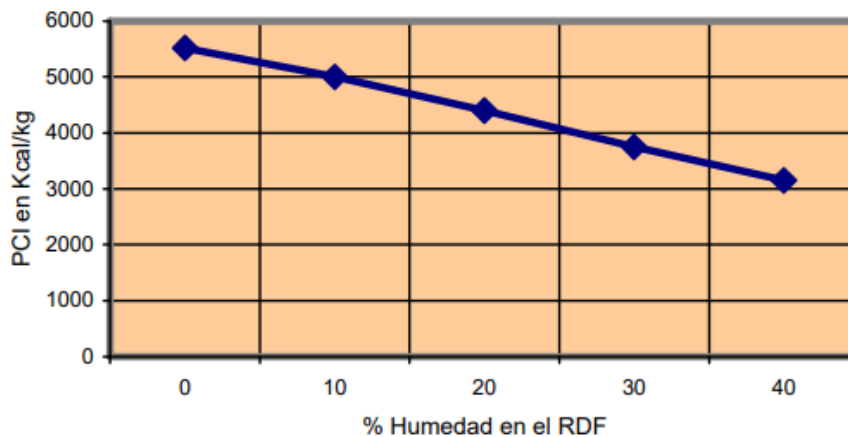


Figura 15. Variación PDI en función a la humedad.(Elias, 2005)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

El diagrama de Tanner es utilizado para determinar la combustibilidad de los RSU, considerando los valores aproximados de humedad, cenizas y la fracción combustible. Para que un residuo sólido sea incinerable debe contener los siguientes parámetros. (Elias, 2005)

- El porcentaje de humedad en los RSU no debe sobrepasar el 50%.
- Los elementos inertes (metal, vidrio, cerámica, entre otros) no pueden alcanzar el 60%.
- La fracción de combustible debe ser como mínimo el 25%.

En el siguiente Figura 16 se muestra la combustibilidad de los RSU relacionado en el triángulo de Tanner, teniendo en cuenta las características en la generación de los residuos sólidos en países como China, US, UE, Japón y Corea del Sur. (Lu et al., 2017). El caso más típico en la generación de RSU es que el 40% sea material combustible, el 15% material inerte y un 45% sea material orgánico constituido por agua en un 80%. (Elias, 2005)

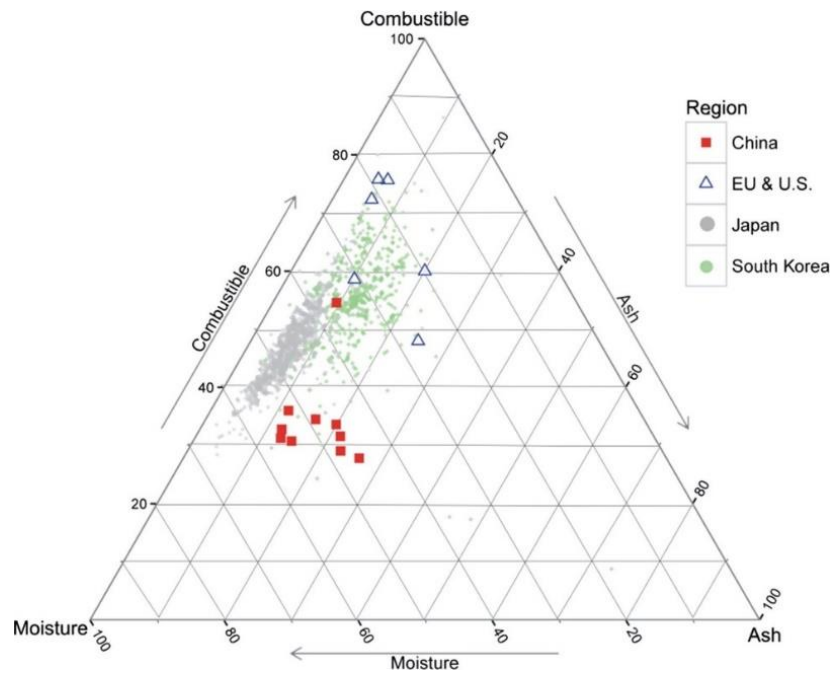


Figura 16. Diagrama de Tanner combustibilidad RSU. (Lu et al., 2017)

4.1.4 Parámetros de operación.

Los parámetros de operación son determinados según el diseño, tipo del incinerador RSU, la composición del residuo como el poder calorífico, humedad, tamaño y la velocidad de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

alimentación (potencial térmico y cantidad), el suministro de aire en diferentes partes del incinerador para controlar la combustión y los gases de chimenea. Los incineradores RSU avanzados contienen sistemas de control que permite modificar y ajustar el funcionamiento, realizando mediciones como la composición del residuo que ingresa a la cámara de combustión y medidas de presión para determinar altura, densidad de los residuos entre otros datos operativos. (Leckner & Lind, 2020)

En la Tabla 2, se muestra algunos ejemplos de los datos más típicos en la operación en los sistemas de incineradores de parrilla móvil y lecho fluidizado. La variación de datos entre un mismo sistema incinerador depende de su diseño, funcionamiento y composición del RSU. Los datos son indicativos y pueden variar de un caso a otro.

Tabla 2. Parámetros de proceso de incineración RSU. (Leckner & Lind, 2020)

PARAMETROS DE PROCESO INCINERADOR RSU (Los datos en negrita representa lo más comunes)		
PARAMETRO	LECHO FLUIDIZADO	PARRILLA MÓVIL
Temperatura del lecho, [° C]	850 . es posible un rango de 800 a 950	<1100 con grandes fluctuaciones (en el lecho). Aproximadamente 1000 en la primera mitad y luego disminuyendo a aproximadamente 600 al final, > 1100 (en el francobordo).
Exceso de aire [%]	20-30, 20	80-100, 50-100, 50- 80 , 30-50 avanzado, 80 normal, 40 avanzado.
Aire primario / secundario [% del total]	60/40 , 50/50. El aire primario se suministra uniformemente al fondo.	60/40 , 66/33. El aire primario se distribuye a las zonas de entrada: menos a las zonas de secado y quemado y más a la zona de combustión principal. El aire secundario se puede suministrar en varios (dos) niveles.
Material del lecho, tamaño [µm]	300 , arena y cenizas de sílice, 200–400.	Sin material de cama.
Tamaño máximo de partículas de residuos [mm]	50–100 [m], <150 Según el diseño del distribuidor de aire.	Solo se eliminan del combustible los objetos extremadamente gruesos.
Poder calorífico inferior [MJ / kg de combustible]	10 Depende del diseño 4.5–32.	10 6–10 sin precalentamiento de aire o enfriamiento por agua de la parrilla.
Velocidad superficial, [m / s]	5	<fluidización mínima

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Altura del lecho / caída de presión [m / kPa]	30/10 (estimación).	1-0,1 (lecho fijo) / caída de presión depende de la velocidad.
Demanda de energía [% de producción térmica]	4-10.	2-5, 150 kWh e / t aproximadamente el 6% de la producción térmica.
Cenizas de fondo / cenizas volantes. [% del total de cenizas]	50/50 , 58/42, 50/50, 3-5 veces más cenizas volantes que cenizas de fondo.	90/10.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4.2 Nuevas tendencias en la incineración RSU

En la actualidad existen diferentes técnicas para el aprovechamiento energético de los RSU por medio de la incineración, que consiste en la conversión termoquímica, que permite combinarlo con la recuperación de energía en forma de calor para la cogeneración de energía eléctrica y térmica generalmente. Para este estudio se analizaron los tres dispositivos más comunes para la valorización energética de los RSU: Parrilla móvil, lecho fluidizado y horno rotatorio. El horno rotatorio es utilizado principalmente en la incineración de residuos peligrosos y otros especiales. El incinerador de parrilla móvil y lecho fluidizado son de los sistemas más comunes para la recuperación de energía en las plantas de incineración RSU anteriormente explicados en la sección 2.

En los incineradores de RSU modernos se han desarrollado nuevas tendencias que permiten mejorar procesos sistemas de combustión permitiendo mejorar su rendimiento energético, aumentar su eficiencia y reducir la emisión de gases contaminantes al producto de la combustión. Entre las tecnologías revisadas encontraron sistemas híbridos, co-combustión, sistemas de recuperación de calor residual y oxi-combustión.

4.2.1 Sistemas híbridos

Son aquellos que permiten integrar dos o más tecnologías acopladas entre sí para tener mayor diversificación en los sistemas y mayor aprovechamiento energético. Los incineradores RSU permiten combinarlos con otros sistemas que permiten mejorar su rendimiento energético y reducción de emisiones al ambiente.

4.2.1.1 Incinerador RSU y turbina de gas natural

Consiste en una central híbrida donde se integran los RSU y el gas natural. Esta combinación permite reducir y mejorar la utilización de residuos, al mismo tiempo mejorar la recuperación de energía por medio de una caldera de recuperación de calor (HRSG), aumentando la eficiencia en generación eléctrica hasta de un 5% y la reducción de emisiones CO_2 y cenizas. Figura 17. (Udomsri et al., 2010).

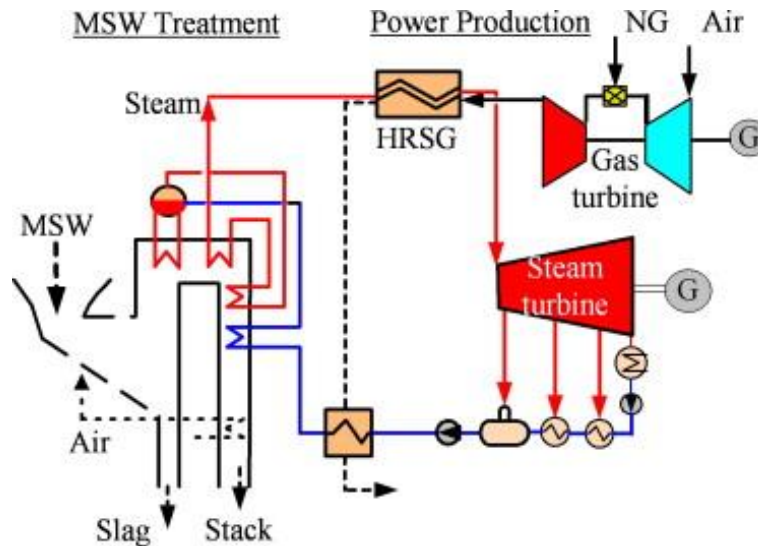


Figura 17. Incinerador RSU y turbina de gas. (Udomsri et al., 2010)

En el estudio se seleccionaron y modelaron cuatro tipos combinaciones del sistema híbrido permitiendo determinar el rendimiento termodinámico de cada caso. La simulación se realizó en condiciones de estado estable y funcionamiento a plena carga.

Combinación 1: Combustible dual híbrido completamente encendido con sobrecalentamiento del vapor suministrado parcialmente por el escape de la turbina de gas. La mayor parte del vapor se produce en el incinerador de RSU. El calor de los gases de combustión descargados de HRSG también se puede utilizar para precalentamiento del aire de combustión en el incinerador RSU.

Combinación 2: Conexión paralela entre los ciclos superior e inferior. Como los gases de escape están limpios, el HRSG puede precalentar la temperatura del vapor típicamente hasta 530 – 560 °C. Si bien la temperatura y el calor del escape HRSG aún son altos, el vapor de agua de alimentación se puede calentar antes de ingresar a la caldera de RSU.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Combinación 3: Esta combinación de combustible dual híbrida totalmente encendida en el que el calor de escape de la turbina de gas se recupera parcialmente en la caldera. En esta, se pueden alcanzar temperaturas de escape más altas de la turbina de gas, la temperatura del vapor de sobrecalentamiento aumenta hasta 530 °C con 72 bar.

Combinación 4: Considera un precalentador de vapor en HRSG y un bypass de escape. El vapor de recalentamiento de la caldera de RSU se calienta a 530 ° C por el escape de la turbina de gas, mientras que el calor restante del escape de la turbina de gas se utiliza para precalentar vapor adicional a una presión más baja. Estas dos líneas de vapor sobrecalentado se suministran luego a una turbina de vapor común. Con altos gases de escape de la turbina de gas, la temperatura del vapor de sobrecalentamiento alcanza los 520 – 530 °C y la presión del vapor se eleva a 72 bar. (Udomsri et al., 2010)

4.2.1.2 Incinerador RSU y Ciclo Orgánico Rankine ORC

El incinerador RSU es adaptado a un sistema que permite la cogeneración CHP para la producción de electricidad mediante un generador acoplado a una turbina de vapor, y calor por medio de un condensador para la calefacción urbana como se muestra en la Figura 18. El sistema se comprende de tres secciones principales como son el incinerador RSU (1), un bloque de energía de ciclo Rankine para la cogeneración (2) y un Ciclo Orgánico Rankine ORC a pequeña escala (3). El ORC aprovecha el calor residual de la chimenea del incinerador RSU y calor del condensador (HE1) para aumentar la capacidad para generar electricidad y calor a baja temperatura para la calefacción urbana. La unidad ORC cuenta fluidos orgánicos alternativos con el propósito que sea ecológica. Este sistema híbrido logra un aumento significativo de electricidad y calor, mejorando la eficiencia energética. Además, permite realizar la limpieza húmeda de los gases de combustión que conlleva a niveles bajos de emisiones de SO_2 , HCl y NH_3 . (Arabkoohsar & Nami, 2019)

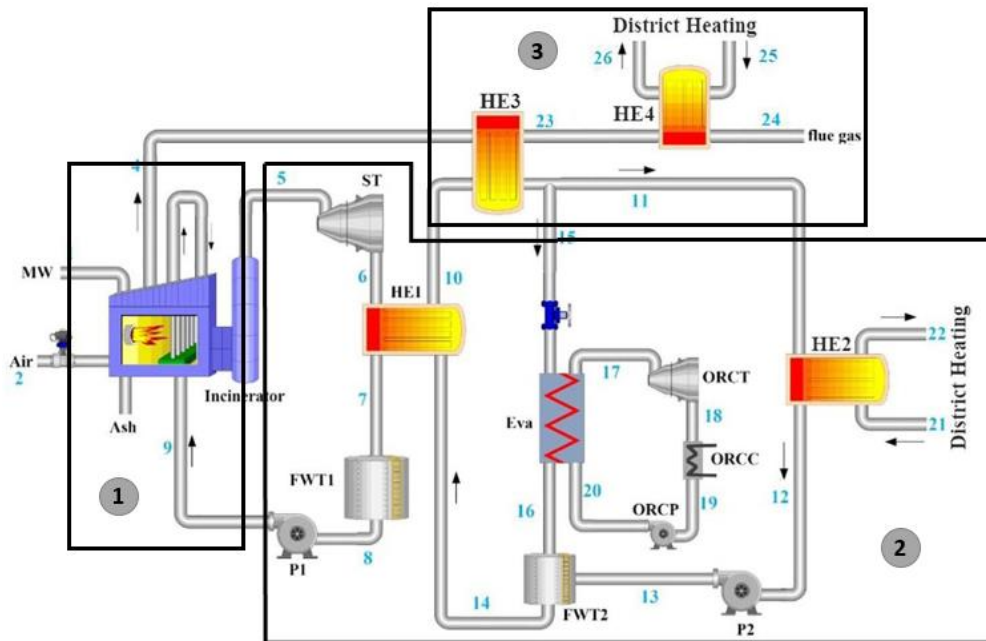


Figura 18. Incinerador RSU y ciclo ORC. (Arabkoohsar & Nami, 2019)

4.2.2 Co-combustión RSU

La co-combustión consiste en la combustión conjunta de dos o más combustibles en una misma cámara de combustión. La incineración RSU no es la excepción para la aplicación de este método ya que permite tener mayor flexibilidad en la operación, mejorar el rendimiento energético y las emisiones de gases al ambiente. A continuación, se revisaron algunos métodos que permitan la mezcla de los RSU con otros combustibles.

4.2.2.1 Co - combustión RSU y carbón para la reducción de las emisiones

Los RSU con alto contenido orgánico y de humedad son difíciles de tratar en los procesos de incineración como se mencionó en la caracterización de los residuos. Este parámetro se ve reflejado en el bajo poder calorífico y afecta negativamente los procesos de incineración RSU. Para mejorar la combustibilidad de estos residuos se realizan mezclas

con otros combustibles como el carbón en este caso, ya que mejora significativamente el poder calorífico, el resultado es una mejor combustión en el incinerador y mayor generación de energía. Además, este proceso inhibe la formación de dioxinas, gases ácidos y emisiones de carbono. (Xu et al., 2020)

La co-combustión de RSU y carbón es una opción eficaz y económica para reducir las emisiones. La Figura 19 muestra un proceso de co-combustión de RSU y carbón, en el que los RSU y el carbón son tratados e inyectado a la cámara de combustión del incinerador.

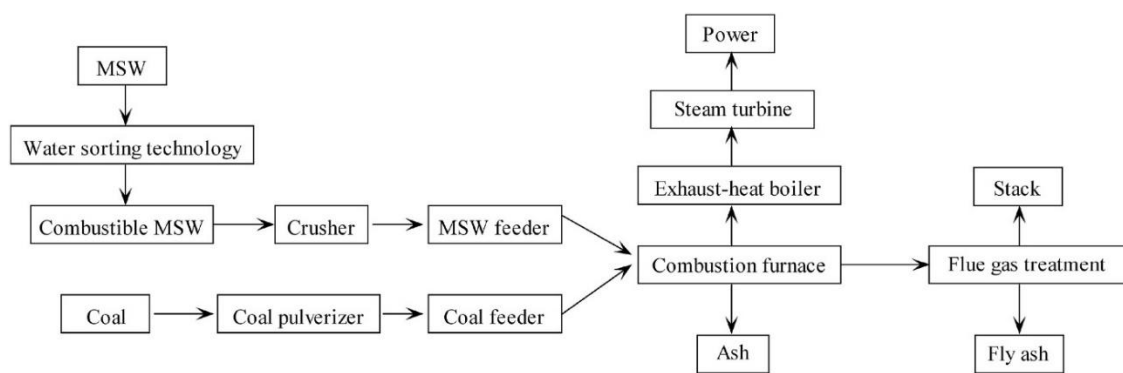


Figura 19. Proceso co-combustión con carbón. (Xu et al., 2020)

En estudios realizados, simulaban varias proporciones de combustión de RSU y carbón en una caldera de lecho fluidizado circulante y encontraron que al adicionar residuos sólidos generaba menores gases ácidos contaminantes como NO , N_2O , SO_2 permitiendo cumplir con estándares ambientales y de emisión de gases. (Xu et al., 2020)

4.2.2.2 Co-combustión RSU, residuos de carbón y residuos de petróleo.

El trabajo experimental por (Glushkov et al., 2020), consiste en un combustible compuesto de RSU (cartón, plástico, caucho, madera), residuos de procesamiento de carbón húmedo y aceite usado de turbina, que genera alto potencial térmico y dependiendo de su composición y sus proporciones tiene ventajas sobre un solo combustible en términos de

costos y emisiones. El estudio permite desarrollar una nueva tendencia de co-combustión ecológica, rentable y energéticamente eficiente en la incineración RSU. Figura 20.

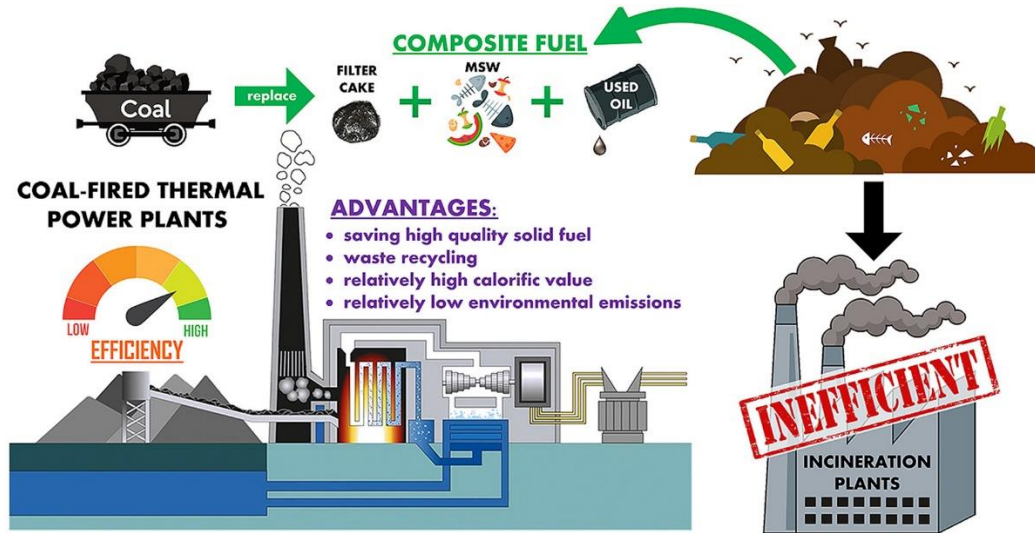


Figura 20. Descripción grafica co-combustión RSU, residuos de carbón y residuos de petróleo. (Glushkov et al., 2020)

En el estudio experimental los residuos sólidos inicialmente fueron triturados, posteriormente fueron mezclados con diferentes composiciones y proporciones de residuos de carbón y aceite de turbina usado. En la Figura 21, se observa los resultados obtenidos en las diferentes composiciones del combustible en función del tiempo de retardo de encendido y temperatura. Para este caso, la combustión con los tres combustibles generó un tiempo más corto de encendido y alcanzó una mayor temperatura aproximadamente 1300 °C. Además, en el estudio se determinó que el combustible compuesto se generan concentraciones más bajas de gases ácidos llegando a tener cerca de un 40% menos de CO_2 , 20% menos de NO_x y 40% menos de SO_x . (Glushkov et al., 2020)

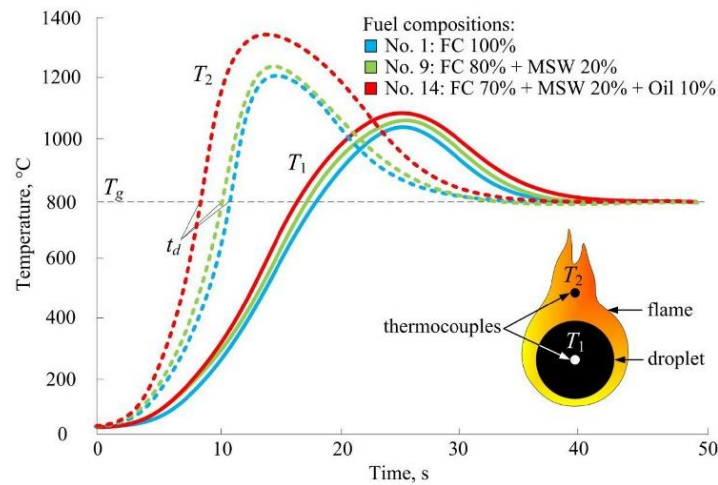


Figura 21. Temperaturas a diferentes composiciones de combustibles durante un periodo. (Glushkov et al., 2020)

4.2.3 Recuperación de calor

Los gases a alta temperatura producto de la incineración RSU son aprovechados energéticamente en todo el proceso por sistemas intercambiadores de calor. La temperatura del gas va disminuyendo gradualmente mientras pasa a través de los intercambiadores, después de éstos, se sigue teniendo calores residuales que pueden ser aprovechadas para mejorar la utilidad de la energía térmica. A continuación, revisaremos algunas tendencias que permiten el aprovechamiento del calor residual de los procesos de incineración que mejoran el rendimiento en los incineradores RSU y las emisiones de gases al ambiente.

4.2.3.1 Aprovechamiento de calor residual para el pretratamiento de los RSU

Este sistema es aplicable a los RSU que por su naturaleza contienen bajo poder calorífico y no son tratados bajo otros métodos para aumentar su combustibilidad. En la Figura 22 se observa el aprovechamiento de calor residual de los gases de combustión del proceso de incineración RSU para un pretratamiento de secado y torrefacción de los RSU, aumentando su poder calorífico quitando el contenido de humedad. (Xing et al., 2021)

En el modelamiento integrado del sistema fueron analizados el flujo de energía y el flujo másico para determinar la energía necesaria para el secado según la cantidad de humedad (masa) que contenga el RSU y la torrefacción, garantizando una tasa de masa residual después del pretratamiento y un coeficiente de energía como se muestra en la Figura 24.

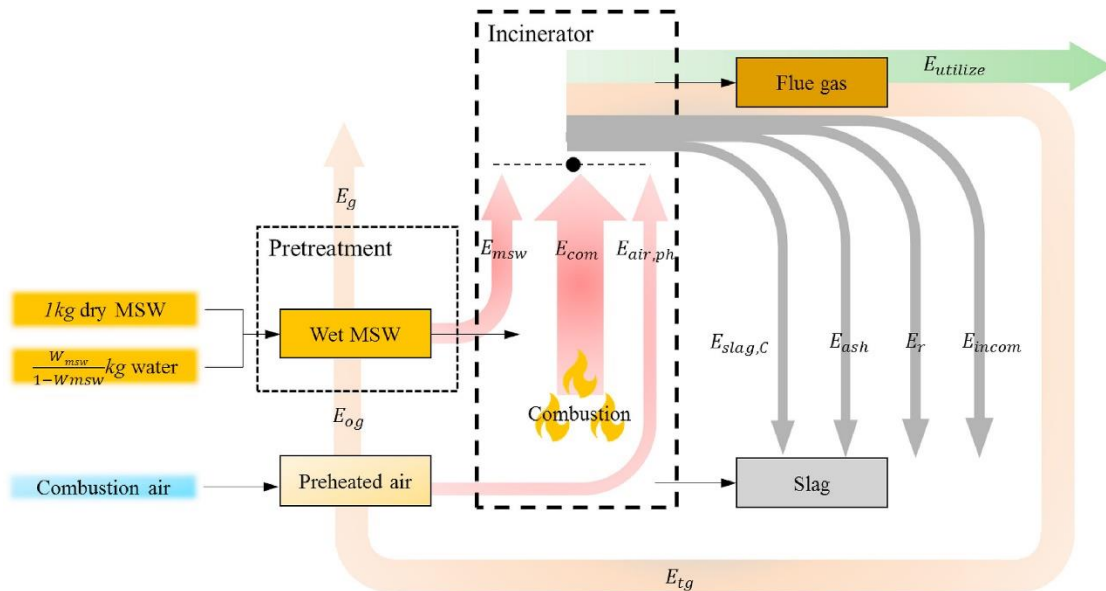


Figura 22. Flujo másico y de energía en un incinerador RSU. (Xing et al., 2021)

En los resultados se obtuvo una mejoría en el rendimiento del incinerador RSU, reduciendo más de un 10% el contenido de vapor de agua en los gases de combustión y mejorando la temperatura en el incinerador debido al aumento en el poder calorífico en los RSU. Para el pretratamiento de los RSU se debe seleccionar una temperatura en la torrefacción teniendo en cuenta la composición y la humedad de los residuos para tener una masa residual adecuada y un poder calorífico óptimo después del pretratamiento. (Xing et al., 2021)

4.2.3.2 Precalentamiento del aire primario con calor residual

El precalentamiento del aire es usado generalmente para mejorar el proceso evaporación de la humedad y la eficiencia térmica en la combustión RSU. En la actualidad es una práctica muy común combinar el calor residual en el precalentamiento del aire primario. En el estudio se revisaron las diferentes características en un incinerador RSU de parrilla móvil cuando se ingresa aire primario precalentado a diferentes temperaturas. (Yan et al., 2021)

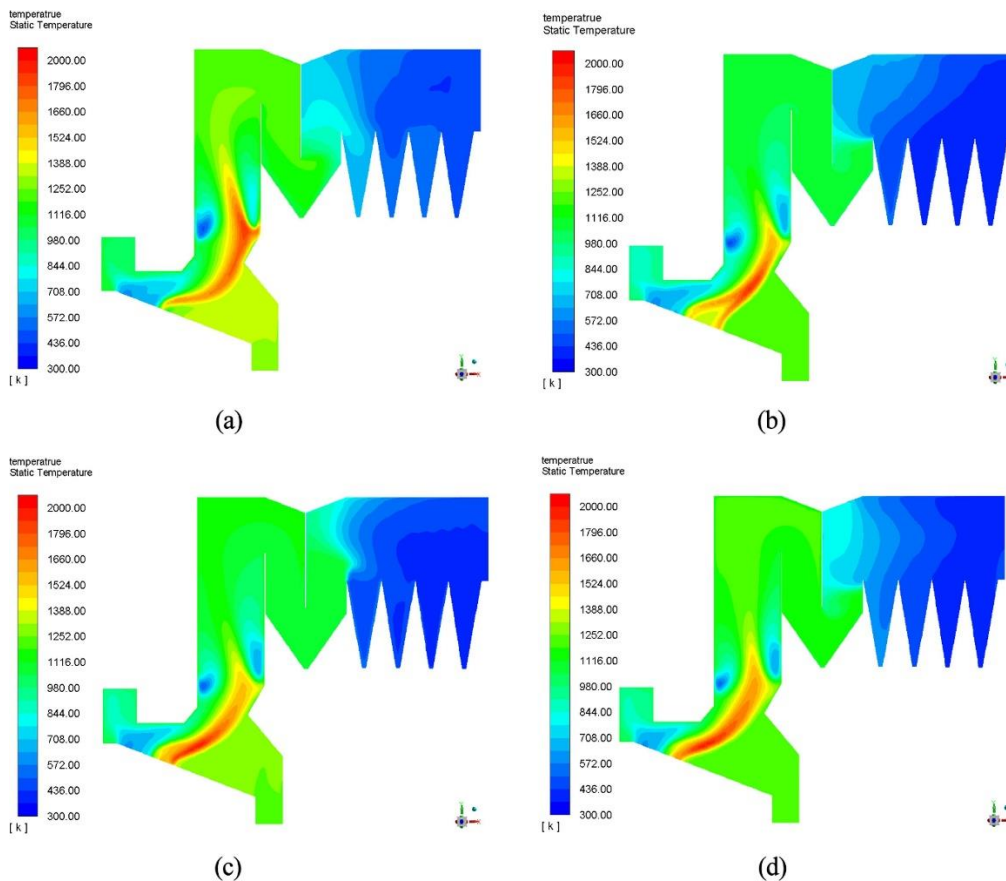


Figura 23. Comportamiento de temperatura variando la temperatura del aire primario. (Yan et al., 2021)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

En la Figura 23 muestra el contorno en el incinerador RSU variando la temperatura en el aire primario que ingresa por la parte inferior de la parrilla (a) 453K, (b) 473K, (c) 493K y (d) 513K. En la simulación se muestra que entre más alta es la temperatura del aire primario el área de evaporación de la humedad era más pequeña. La temperatura más alta alcanzadas en el incinerador RSU fue cuando se ingresó el aire primario a 513K acelerando la velocidad de ignición y el tiempo de combustión fue menor aumentando la eficiencia térmica. Sin embargo, las temperaturas tan altas pueden generar efectos negativos en la formación intensificada de NO_x y el riesgo de daños en el incinerador. (Yan et al., 2021)

Teniendo en cuenta los pros y los contras en el estudio, se determinó que la temperatura del aire primario óptima para el proceso de incineración RSU era de 453K, temperatura que finalmente se debe contemplar en el aprovechamiento de calor residual.

4.2.4 Oxi-combustión

Tecnología que consiste en la utilización de oxígeno puro en lugar de aire para la generar una mezcla enriquecida de oxígeno en el proceso de combustión. Producto de la combustión se genera H_2O y CO_2 , que posteriormente pueden ser separados fácilmente del vapor de agua mediante condensación. Esta tecnología también es estudiada y aplicada en los procesos de incineración RSU permitiendo mejorar el rendimiento térmico y la reducción en la generación de gases contaminantes.

4.2.4.1 Oxi-combustión en incinerador RSU

La tendencia de oxi-combustión consiste en la incineración RSU enriquecida de oxígeno y en comparación a la co-combustión de carbón es mejor en términos de costo, generar altas temperaturas en la operación con menores perdidas en los gases de combustión reduciendo el impacto negativo al ambiente. (Fu et al., 2015)

En la Figura 24 se representa un típico incinerador RSU de parrilla con un sistema de inyección de oxígeno y un sistema de recirculación de gases de combustión. El oxígeno es suministrado por un tanque de oxígeno líquido el cual debe ser evaporado y calentado con vapor a alta temperatura para ser inyectado en el incinerador RSU. El gas recirculante es

aprovechado para controlar la temperatura en la combustión y compensar el volumen de N_2 faltante para garantizar que haya suficiente gas que permita transportar el calor debido a la reducción del aire primario.

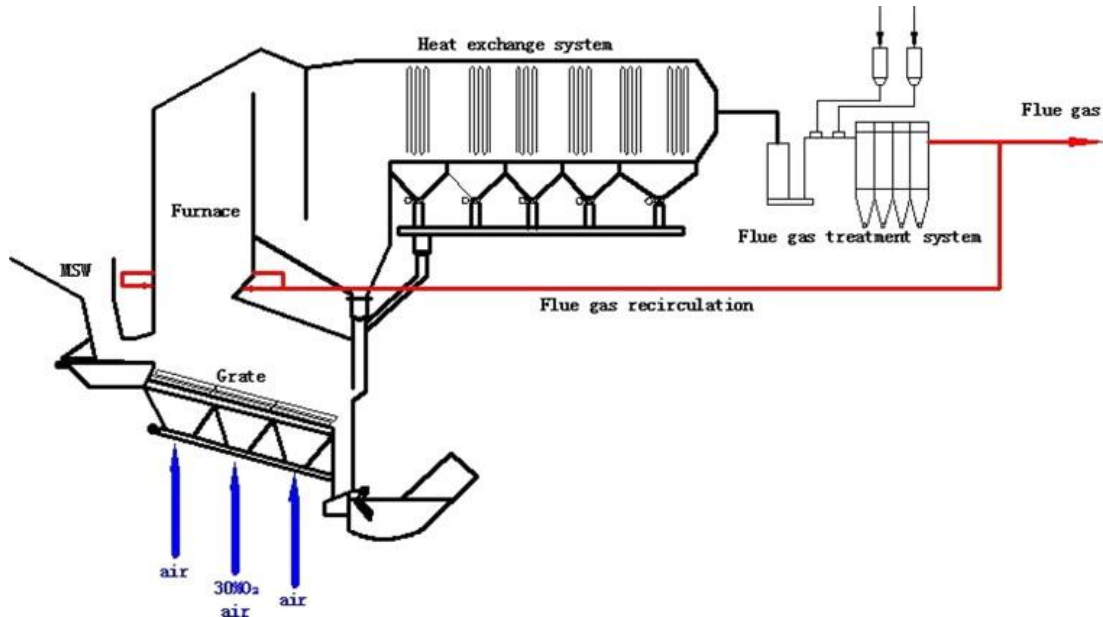


Figura 24. Sistema de Incineración RSU enriquecido con oxígeno. (Fu et al., 2015)

En el estudio se compararon dos de las tendencias en la incineración RSU co-combustión y oxi-combustión validando comportamientos de temperatura de combustión y sus rendimientos. En la Figura 25 se representan algunos casos en que según la temperatura de combustión isotérmica (T_a), el efecto de combustión de la incineración enriquecida con oxígeno al 25% de O_2 ($a = 1,43$) es similar al de la co-incineración de RSU con una relación de masa de carbón del 20% ($a = 1,91$) donde a es el coeficiente de aire. Sin embargo, el primero es superior al segundo en términos de costo de planta, pérdida de gases de combustión e impactos ambientales. A pesar de que los costos de la planta de co-incineración de RSU con una proporción de masa del 5% y el 10% de carbón ($a = 1,91$) son inferiores al 25% de la incineración enriquecida con oxi O_2 ($a = 1,43$), la incineración con un 25% de oxígeno enriquecido con O_2 conserva las ventajas en controles del efecto de la combustión y de las emisiones contaminantes. (Fu et al., 2015)

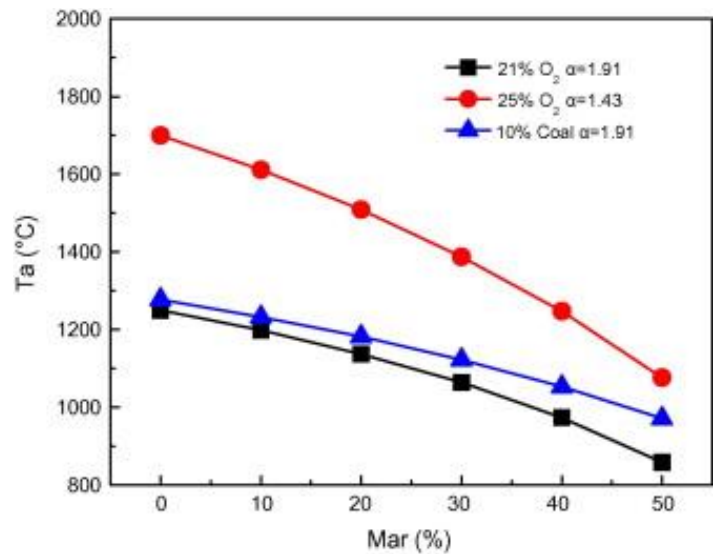


Figura 25. Contenido de humedad sobre la temperatura a diferentes proporciones con co-combustión y oxi-combustión. (Fu et al., 2015)

4.3 Eficiencia y control de gases

La eficiencia de la recuperación de energía en los procesos de incineración RSU es uno de los parámetros con mayor importancia en la valorización energética de los residuos sólidos ya que permite cuantificar la cantidad de energía contenida, producida y utilizada en las plantas de incineración RSU. Las plantas con producción de calor o electricidad contienen niveles más bajos de eficiencia que las plantas de cogeneración para la producción de calor y electricidad. La eficiencia además de cuantificar y mejorar el rendimiento energético también permite determinar si se encuentra en los niveles establecidos por las normas legislativas.

La incineración RSU igualmente necesita una limpieza eficiente de los gases para cumplir con las normas de emisión de aire. En este capítulo se revisaron métodos para determinar el rendimiento en los sistemas de incineración RSU bajo estándares normativos y los métodos utilizados para el de control de gases cumpliendo con criterios ambientales.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4.3.1 ASME PTC 34

La norma contiene una serie de directrices que partir de las cuales se pueden crear procedimientos de diseño y de pruebas para cuantificar el rendimiento de los incineradores RSU con una caldera de vapor. La directriz está diseñada para cámaras de combustión que permiten quemar residuos en un rango de capacidad de 140 a 900 toneladas por día a (TPD) y para calderas de recuperación de calor con un flujo de vapor de 30,000 lb/hr hasta 300,000 lb/hr . (Deduck & Xiao, 2012)

El método para cuantificar el rendimiento de los incineradores RSU consiste en utilizar la caldera de recuperación de energía como calorímetro con el propósito de determinar el poder calorífico HHV de los RSU ya que por su naturaleza (voluminosos y heterogéneos) se hace complejo determinarlo con un instrumento calorímetro. Primero debe pesarse los residuos sólidos que ingresan por medio de la tolva a la cámara de combustión por un periodo de prueba a corto plazo que generalmente es 8 horas o a largo plazo que va desde 3 a 30 días. En segundo lugar, se mide el calor de vapor de la caldera de recuperación de energía y, en tercer lugar, se determina las pérdidas de calor de la caldera. Las pérdidas de calor menores se recomiendan en ocasiones no ser medido ya que no impacta sustancialmente el rendimiento. Por último, por medio de un balance de calor sencillo de entrada, salida y pérdidas se determina el poder calorífico de los RSU.

Los resultados de las pruebas de eficiencia de la caldera, entrada de calor en la caldera y el poder calorífico del combustible RSU permite mejorar el rendimiento como también mejorar las condiciones operativas y de mantenimiento de los incineradores RSU. Por ejemplo, puede usar el HHV para saber si la cámara de combustión está siendo operada dentro de los límites del diagrama de encendido, capacidad de comparar operación actual con la futura y detectar la degradación del rendimiento, entre otras. (Deduck & Xiao, 2012)

Para mejorar el rendimiento medido del combustible RSU, es decir, masa de combustible consumida por unidad de tiempo en condiciones estándar, lo primero es determinar la producción de calor del generador de vapor de diseño o medido durante la prueba, luego dividirlo por la eficiencia de combustible corregido para calcular la entrada de calor del combustible corregido. La entrada de calor del combustible corregida posteriormente se divide por el poder calorífico superior de diseño del combustible para determinar el rendimiento de combustible corregido. En ocasiones el poder calorífico superior del

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

combustible de diseño se denomina HHVd "Residuos de referencia". (Deduck & Xiao, 2012)

$$QrFCr = \frac{QrOd,t}{EFCr} (1)$$

$$MrFCr = \frac{QrFCr}{HHVd} (2)$$

Donde $QrFCr$ es la entrada de combustible del generador de vapor, corregido a condiciones de diseño en btu/hr

$HHVd$, es el poder calorífico superior del combustible de diseño (a veces denominado 'Residuo de referencia' HHV) en btu/lb

$QrOd, t$ es la medida de diseño o prueba de la producción de calor del generador de vapor en btu/hr

$EFCr$, es la eficiencia de combustible corregida a las condiciones de diseño en %

$MrFCr$, caudal másico de combustible quemado, corregido al diseño en condiciones de combustible y de contorno en lbm/hr

4.3.2 Directiva 2008/98/CE Formula R1 de eficiencia

La tendencia en la gestión de residuos es la recuperación de energía. La unión europea por medio de la Directiva 2008/98/CE define una distinción entre los incineradores RSU que permiten recuperación de energía y eliminación de los residuos sólidos. Para las plantas de incineración RSU donde la eficiencia de la recuperación de energía es superior o iguales a 0,6 se consideran plantas de recuperación de energía de alta eficiencia y tienen ventajas legislativas, mientras las que presentan eficiencias inferiores 0,6 se consideran plantas para la eliminación de residuos y son consideradas sin recuperación de energía. Aunque

las plantas con recuperación de energía por debajo 0,6 pueden contener una recuperación de energía significativa de energía, la directiva busca promover una recuperación de energía de alta eficiencia y fomentar la innovación en los incineradores RSU. (2008/98/EC, 2008)

Por medio de la directiva define la medida de eficiencia de recuperación de energías mediante la forma frecuentemente llamada Fórmula R1. La Figura 26 representa la energía exportada de los residuos más la energía utilizada internamente y la energía importada de los desechos más otras energías utilizadas para la valorización energética. Es una representación gráfica de balance de energía y donde se determinan los límites de la Fórmula R1 para determinar la eficiencia en una planta de incineración RSU con recuperación de energía. (2008/98/EC, 2008)

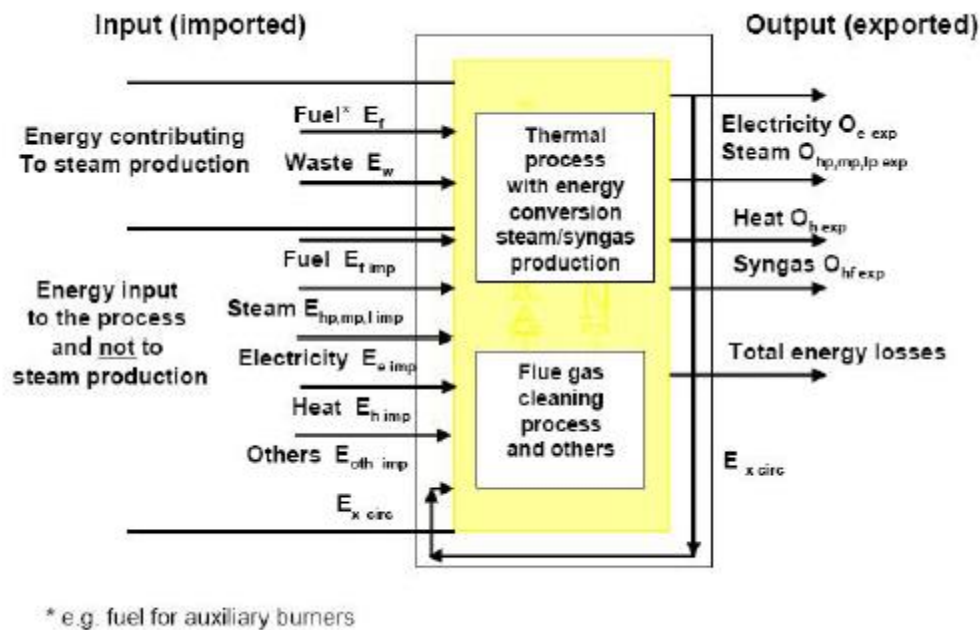


Figura 26. Límites del sistema de la Fórmula R1 en una planta de incineración RSU. (2008/98/EC, 2008)

Calculo de eficiencia energética de la Formula R1 en una planta de incineración RSU. (Grosso et al., 2010)

$$Eficiencia\ Energía = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 * (E_w + E_f)}$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Donde, E_p es la energía anual producida como calor E_{th} y/o electricidad E_{el} en $GJ/año$

$$E_p = 1,1 * E_{th} + 2,6 * E_{el}$$

E_f , Es la entrada de energía anual al sistema a partir de combustibles. Se obtiene sumando los productos de cada flujo de combustible por su poder calorífico neto (NCV – siglas en inglés). $GJ/año$

$$E_f = \sum m_{fuel,i} * NCV_{fuel,i}$$

E_w , es la energía anual contenida en los RSU tratados, se calcula utilizando el poder calorífico inferior neto. $GJ/año$

$$E_f = m_{waste} * NCV_{waste}$$

E_i , corresponde a la energía anual importada, excluidas E_w y E_f . 0,97 es un factor de pérdidas de energía de cenizas de fondo y radiación. Sin embargo, el pretratamiento y pos tratamiento de los RSU, como el tratamiento de cenizas de fondo, no están incluidos en la Fórmula R1. (ERM, 2016)

La directiva también determina los umbrales de eficiencia en la operación de las instalaciones de incineración RSU según la fecha de inicio de operación. Para las instalaciones en operación y autorizadas antes del 01 de enero de 2009 la eficiencia debe ser igual o superior a 0,60 y para las instalaciones después del 31 de diciembre de 2008 debe ser igual o superior a 0,65. (Grosso et al., 2010)

Las plantas de incineración RSU con recuperación de energía CHP puede tener mayores eficiencias si son comparadas con las que producen la misma cantidad de calor y electricidad. La Tabla 4 muestra que según la valorización energética en la incineración

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RSU en UE, la cogeneración permite tener eficiencias más altas e incluso el tamaño de la planta es un factor importante para determinar las eficiencias. Las plantas más grandes son más eficientes que las pequeñas.

Tabla 3. Eficiencia promedio según el tipo de recuperación de energía en la UE. (Grosso et al., 2010)

Tipo de plantas de incineración RSU	Fórmula R1 eficiencia η_{en}	Eficiencia promedio de recuperación de energía	Flujo medio de RSU [T/año]
Plantas de cogeneración	$\frac{W_{el} + Q_c}{m_{waste} * NCV_{waste}}$	0,71	230.000
Principalmente plantas productoras de electricidad.	$\frac{W_{el}}{m_{waste} * NCV_{waste}}$	0,49	150.000
Principalmente plantas productoras de calor	$\frac{Q_c}{m_{waste} * NCV_{waste}}$	0,64	90.000

La Fórmula R1 favorece las plantas de incineración RSU que aprovecha la energía de cogeneración en comparación con las plantas que producen solo electricidad o calor, ya que es mucho más exigente alcanzar una eficiencia suficientemente alta para generar una sola fuente de energía como se muestra en la Tabla 3. (Leckner & Lind, 2020)

En la UE existe un total de aproximadamente de 279 plantas de incineración RSU como se muestra en la Figura 27, de las cuales el 60% superan el umbral definido por la Directiva de 0,6 y son caracterizados como de recuperación de energía, el restante no cumple con la normativa por lo tanto son determinados como incineradores RSU para la eliminación sin recuperación de energía. (Grosso et al., 2010)

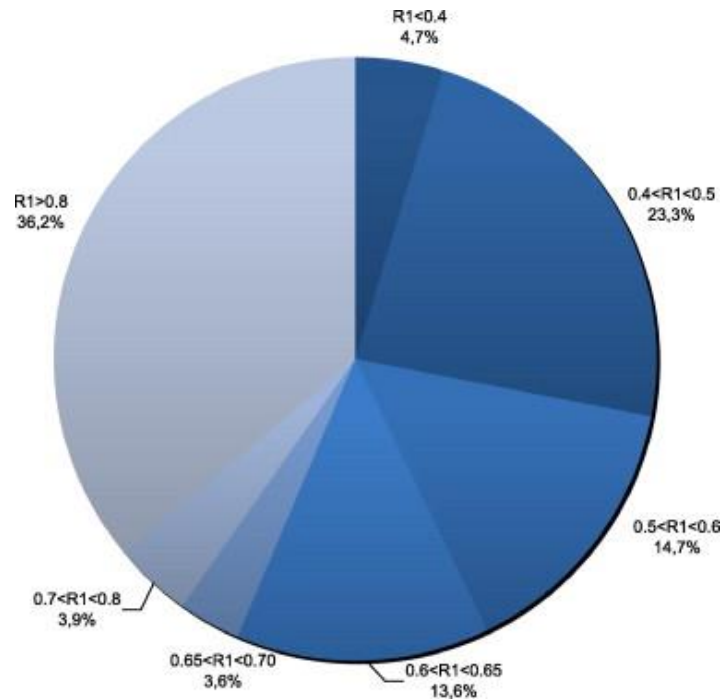


Figura 27. Clasificación de plantas de incineración RSU en la UE según su eficiencia energética. (Grosso et al., 2010)

4.3.3 Control de emisión de gases.

Los gases contaminantes se pueden prevenir desde la composición de los residuos hasta los parámetros operacionales de los incineradores con el control de emisiones y reducción mediante equipos que permiten la limpieza de los gases de combustión. Los sistemas de control de emisiones en los incineradores RSU se centran en reducir los productos de la combustión incompleta y controlar la formación de dioxinas *PCDD / Fs* como se muestra en la Figura 28 y otras cantidades gases ácidos como *CO, HCl, HF, HBr, HI, NO_x, SO₂* y compuestos de metales pesados. (AlQattan et al., 2018). Para reducir los gases contaminantes por ejemplo se controla el aire de alimentación en la cámara de combustión de manera escalonada para impedir la generación de los *NO_x*. (Lu et al., 2017)

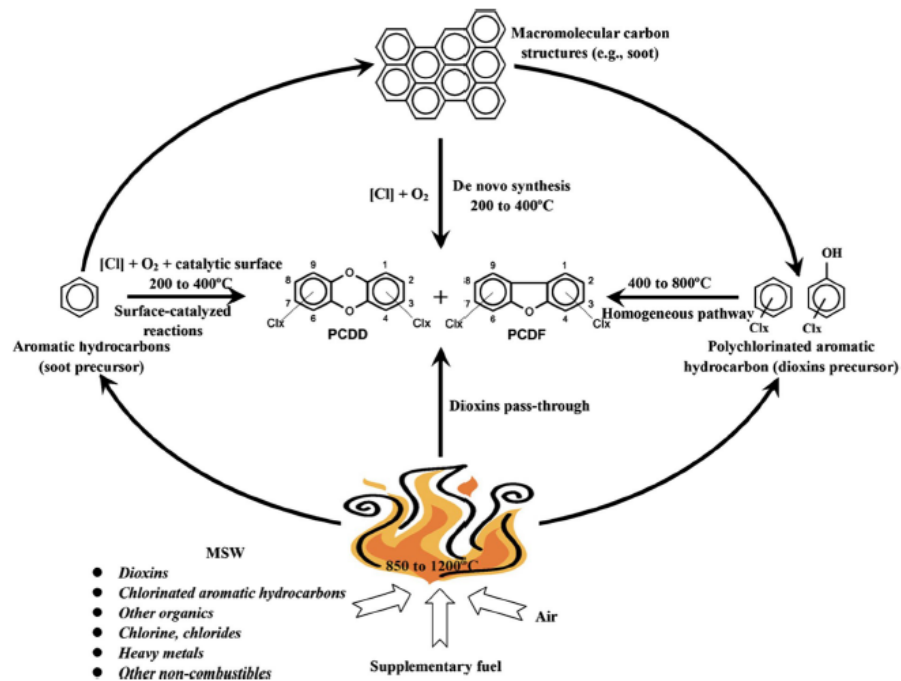


Figura 28. Rutas de producción de dioxinas en la combustión RSU. (Li et al., 2019)

El control de emisiones en la cámara de combustión no reduce las emisiones por completo de gases al ambiente y ninguna tecnología por si sola puede realizar esta tarea y es por eso necesario utilizar un sistema para el control de gases APC (siglas en ingles) que consta de una serie de etapas para el control de cenizas volantes, metales pesados, gases ácidos, mercurio, NO_x y dioxinas. (Vehlow, 2015)

El control de emisiones en la combustión no corrige por completo el tratamiento de los gases, que además de contaminar al ambiente, es necesario para el cumplimiento a los estándares de emisiones. Los sistemas de tratamiento de gases APC combinan una serie de procesos individuales para eliminar varios contaminantes. Los sistemas APC varían sus características especialmente en la eficiencia que va relacionada a los estándares de emisiones de cada país o región (Ver Tabla 4) y que además son complementados con otros sistemas como los economizadores, precipitadores electrostáticos, cámara de filtros o depurador de gases.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Tabla 4. Estándares de emisiones al aire por países. (Vehlow, 2015)

	Gas sin procesamiento [mg/m ³]	UE [273K, 101.3kPa, 11% en volumen de O ₂]	Estados Unidos [273K, 101.3kPa, 7% en volumen de O ₂]	China [273K, 101.3kPa, 11% en volumen de O ₂]	Japón [273K, 101.3kPa, 14% en volumen de CO ₂]
CO	<10-30	50	100	150	50
TOC	44470	10			
Polvo	1000–5000	10	24	80	10–50
HCl	500-2000	10	25	75	15–50
HF	44470	1			
SO ₂	150–400	50	30	260	11.232
NO _x	200–500	200	150	400	30-125
Hg	0,1-0,5	0	0,08	0,2	0.03–0.05
CD	0,1-0,5	0,05 [Cd + Tl]	0,02	0,1	
PCDD / F [ng(I-TE)/m ³]	44470	0,1	0,3	0,1	0

4.3.3.1 Control de polución de aire APC

Las técnicas de APC se implementan en las plantas de incineración RSU para cumplir con las normativas de emisiones ambientales en cuanto a metales, dioxinas, óxidos de nitrógeno NO_x , polvo, etc. A continuación, se revisaron algunos métodos para la reducción de polvo, gases ácidos de óxidos de nitrógeno y dioxinas en las plantas de incineración RSU de Francia. (Beylot et al., 2018)

La Figura 29, muestra un diagrama de un sistema APC con las distintas etapas y los productos del proceso de control de gases. El primer para la limpieza y reducción de gases suele ser la eliminación de volantes directamente aguas abajo de la caldera. El siguiente paso es la neutralización de gases ácidos en un sistema de lavado en seco o en húmedo, luego permite la reducción de NO_x mediante la reducción catalítica selectiva (SCR siglas en inglés) o reducción catalítica no reducida (SNCR siglas en inglés) y por último un paso de pulido también llamado “filtro policial”, un absorbente a base de carbono para la eliminación de mercurio y dioxinas. (Vehlow, 2015)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

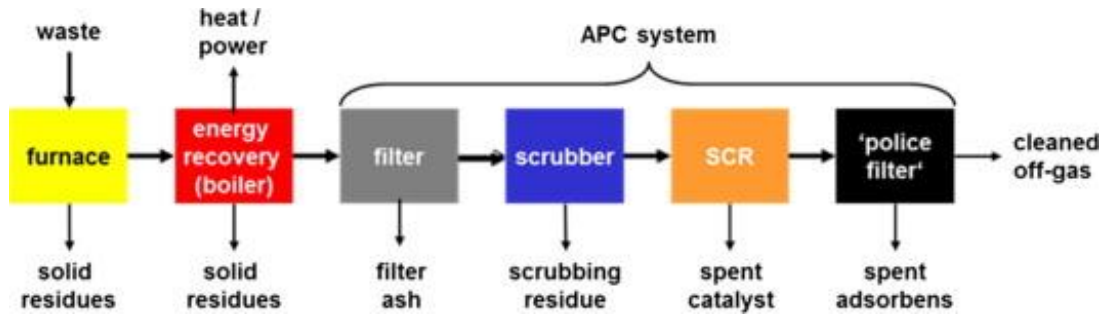


Figura 29. Diagrama simplificado de un sistema control de gases. (Vehlow, 2015)

4.3.3.1.1 Reducción de polvo y gases ácidos

Las principales técnicas para la reducción del polvo y gases ácidos son los filtros de bolsa y precipitadores electrostáticos. Estos sistemas permiten la reducción de partículas sólidas que van desde un tamaño de 1 micrómetro hasta 1 milímetro y son combinados para el tratamiento para la reducción gases ácidos como el cloruro de hidrógeno HCl , emisiones de fluoruro de hidrógeno y óxidos de azufre SO_x . (Beylot et al., 2018)

- Procesos secos: implican el uso de un agente de absorción seca como cal apagada, bicarbonato de sodio y generan un producto de reacción seco. Suelen estar combinados con filtros de bolsa solamente o filtros de bolsa con electro-filtros.
- Procesos semi-húmedos: implican el uso de una solución o suspensión acuosa como agente de sorción como la cal apagada, cal viva y generan un producto de reacción seco por evaporación del agua. Los procesos semi-húmedo generalmente son implementados con filtros de bolsa.
- Procesos húmedos: Implican el uso de una solución de lavado que contiene el reactivo de soda cáustica, cal viva y generan un producto de reacción acuoso. Generalmente están implementados con electro-filtros.

4.3.3.1.2 Reducción de óxidos de nitrógeno y dioxinas

La eliminación de dioxinas se realiza gracias a la adición de reactivos principalmente coque de lignito y carbón activado y al mismo tiempo, para reducir las emisiones de NO_x (Beylot et al., 2018).

- Reducción catalítica selectiva (SCR): Se mezcla amoníaco con aire se añade a los gases de combustión y se pasa sobre un catalizador. Además de la reducción de las emisiones de NO_x , permiten la reducción de dioxinas.
- Reducción selectiva no catalítica (SNCR): Para la reducción se inyecta un agente que típicamente es amoníaco NH_3 o urea en el incinerador RSU y reacciona con NO_x .

La Figura 30 representa un sistema APC, se observa como las dioxinas se reducen drásticamente durante todo el proceso y en los sistemas modernos puede estar por debajo de $0.01 \text{ ng}(I - TE)/m^3$, cumpliendo con los estándares de emisiones. (Keifer & Effenberger, 2013)

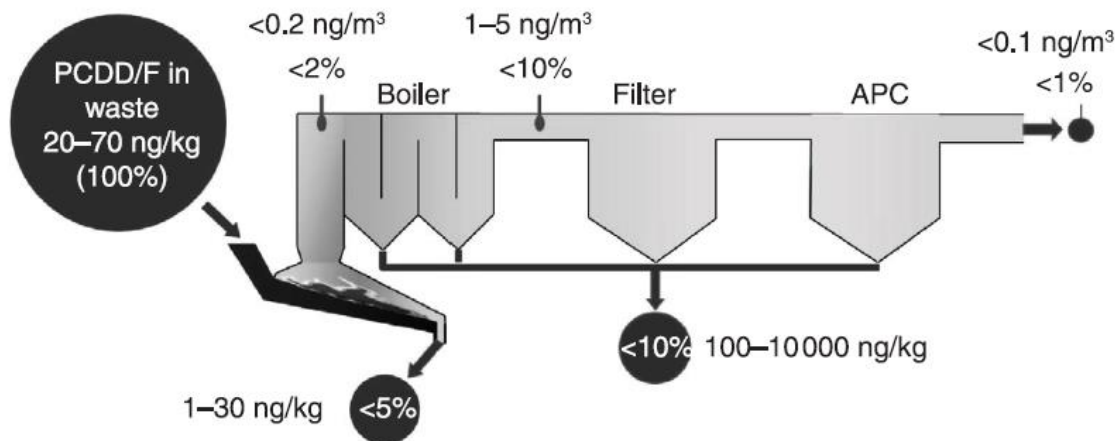


Figura 30. Control de emisiones moderno reduciendo el flujo másico de las dioxinas. (Keifer & Effenberger, 2013)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo de la investigación se evaluaron las tendencias utilizadas en la incineración de los residuos sólidos urbanos con recuperación de energía y sistemas modernos que permiten el control de emisión de gases al ambiente, que a su vez garantizan el cumplimiento de estándares en eficiencia y normativas ambientales en emisión de gases.

La composición de los RSU es extremadamente diversa y dependiendo del nivel socioeconómico donde se generen influyen en el poder calorífico y la cantidad de humedad. Estos parámetros determinan sustancialmente la combustibilidad, el rendimiento, el modo de operación según los sistemas de control en los incineradores RSU y las emisiones de gases al ambiente.

En la literatura analizada se encontraron tendencias en los incineradores RSU que permiten mejorar parámetros de difícil control como los son el poder calorífico y la humedad. La co-combustión que es la mezcla de los RSU con otros combustibles como por ejemplo el carbón permite mejorar la combustibilidad cuando los RSU presentan bajo poder calorífico y que además de mejorar el rendimiento térmico, permiten la reducción de emisiones al ambiente ya que inhibe la formación de dioxinas, gases ácidos y emisiones de carbono.

La recuperación de calor es una de las tendencias que permiten aprovechar el calor residual de los procesos para mejorar el parámetro de humedad en un pretratamiento de secado y torrefacción de los RSU, aumentando el poder calorífico quitando el contenido de humedad y así mejorando la temperatura y el rendimiento del incinerador RSU.

El crecimiento en la capacidad de incineración RSU en los últimos años ha tenido una estabilidad debido a que algunos países han encontrado una capacidad de incineración suficiente en relación a la cantidad de RSU generados y unas estrictas políticas para la emisión de gases lo que han permitido en los últimos tiempos mejorar la recuperación de energía con nuevas tendencias como los son sistemas híbridos, la co-combustión, la oxicomustión, la recuperación de calor garantizando una mayor eficiencia y mejorando el control de las emisiones de gases al ambiente con sistemas APC que permiten el cumplimiento a estándares ambientales.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

La eficiencia en las plantas de incineración RSU es un parámetro de mayor importancia ya que permite cuantificar la cantidad de energía contenida, producida y utilizada en el proceso. Los métodos revisados para determinar la eficiencia en los incineradores RSU es la normativa americana ASMEC PTC 43 que contiene serie de directrices que partir de las cuales se pueden crear procedimientos de diseño y de pruebas para cuantificar el rendimiento de los incineradores RSU con una caldera de vapor y la norma de eficiencia de la unión europea por medio de la Directiva 2008/98/CE que además de cuantificar y mejorar el rendimiento energético también permite determinar si se encuentra en los niveles establecidos para catalogar si las plantas se encuentran con o sin recuperación de energía.

En la literatura se encontró que las plantas de incineración RSU más grandes son más eficientes que las pequeñas, sin embargo, se puede apreciar que las nuevas tendencias en la incineración permiten mejorar la eficiencia, rendimientos y su vez integrarlas con fuentes de energías renovables abren las puertas para implementar pequeñas plantas mejorando significativamente la recuperación de energía en forma de calor, el control de emisión de gases y la posibilidad de ser sostenibles en el tiempo.

6 TRABAJO FUTURO

Estudiar la viabilidad técnica de una planta piloto de incineración RSU a que incorpore las tendencias en la incineración y permitiendo integrarla con fuentes de energía renovable como por ejemplo la energía solar, el biogás garantizando alto aprovechamiento de la energía y cumpliendo los estándares de emisiones de gases al ambiente.

Realizar estudios de costos de inversión y operación para la implementación de la incineración RSU con las tendencias analizadas en Colombia.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

REFERENCIAS

- 2008/98/EC, D. (2008). *Guidelines on The Interpretation of The R1 Energy Efficiency Formula for Incineration Facilities Dedicated to The Processing of Municipal Solid Waste*. 33.
- AlQattan, N., Acheampong, M., Jaward, F. M., Ertem, F. C., Vijayakumar, N., & Bello, T. (2018). Reviewing the potential of Waste-to-Energy (WTE) technologies for Sustainable Development Goal (SDG) numbers seven and eleven. *Renewable Energy Focus*, 27(December), 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.09.005>
- Arabkoohsar, A., & Nami, H. (2019). Thermodynamic and economic analyses of a hybrid waste-driven CHP–ORC plant with exhaust heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 187(March), 512–522. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.027>
- Beylot, A., Hochar, A., Michel, P., Descat, M., Ménard, Y., & Villeneuve, J. (2018). Municipal Solid Waste Incineration in France: An Overview of Air Pollution Control Techniques, Emissions, and Energy Efficiency. *Journal of Industrial Ecology*, 22(5), 1016–1026. <https://doi.org/10.1111/jiec.12701>
- Cheremisinoff, P. (1992). Combustion Principles. *Waste Incineration Handbook*, 1–32. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-0282-2.50004-4>
- Deduck, S. G., & Xiao, L. (2012). *NAWTEC20-7004 ASME PTC 34*. 1–6.
- Elias, X. (2005). *Valorización energética de residuos. aplicaciones*. 1228.
- ERM. (2016). *R1 Energy Efficiency Calculation*. 9.
- Fu, Z., Zhang, S., Li, X., Shao, J., Wang, K., & Chen, H. (2015). MSW oxy-enriched incineration technology applied in China: Combustion temperature, flue gas loss and economic considerations. *Waste Management*, 38(1), 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.026>
- Glushkov, D. O., Paushkina, K. K., & Shabardin, D. P. (2020). Co-combustion of coal processing waste, oil refining waste and municipal solid waste: Mechanism, characteristics, emissions. *Chemosphere*, 240, 124892. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124892>
- Grosso, M., Motta, A., & Rigamonti, L. (2010). Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive. *Waste Management*, 30(7), 1238–1243. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.036>
- Keifer, G., & Effenberger, F. (2013). Waste to energy conversion technology. In *Angewandte Chemie International Edition* (Vol. 6, Issue 11).
- Leckner, B., & Lind, F. (2020). Combustion of municipal solid waste in fluidized bed or on grate – A comparison. *Waste Management*, 109(2020), 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.050>
- Li, X., Ma, Y., Zhang, M., Zhan, M., Wang, P., Lin, X., Chen, T., Lu, S., & Yan, J. (2019). Study on the relationship between waste classification, combustion condition and dioxin emission from waste incineration. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 1(2), 91–98.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- <https://doi.org/10.1007/s42768-019-00009-9>
- Lu, J. W., Zhang, S., Hai, J., & Lei, M. (2017). Status and perspectives of municipal solid waste incineration in China: A comparison with developed regions. *Waste Management*, 69, 170–186. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.014>
- Makarichi, L., Jutidamrongphan, W., & Techato, K. anan. (2018). The evolution of waste-to-energy incineration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91(April), 812–821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.088>
- Mondal, P., & Yadav, A. (2018). Mondal, P., & Yadav, A. (2018). An overview on different methods of Domestic Waste Management and Energy generation in India. 2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology, ICSCET 2018, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICSCET.2018.853735>. 2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology, ICSCET 2018, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICSCET.2018.8537357>
- Rogoff, M. J., & Screve, F. (2011). WTE technology. *Waste-to-Energy*, 21–43. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4377-7871-7.10003-6>
- Udomsri, S., Martin, A. R., & Fransson, T. H. (2010). Economic assessment and energy model scenarios of municipal solid waste incineration and gas turbine hybrid dual-fueled cycles in Thailand. *Waste Management*, 30(7), 1414–1422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.009>
- Vehlow, J. (2015). Air pollution control systems in WtE units : An overview. *Waste Management*, 37, 58–74. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.025>
- Xing, Z., Ping, Z., Xiqiang, Z., Zhanlong, S., Wenlong, W., Jing, S., & Yanpeng, M. (2021). Applicability of municipal solid waste incineration (MSWI) system integrated with pre-drying or torrefaction for flue gas waste heat recovery. *Energy*, 224, 120157. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120157>
- Xu, J., Huang, Q., & Wang, F. (2020). Co-combustion of municipal solid waste and coal for carbon emission reduction: A bi-level multi-objective programming approach. *Journal of Cleaner Production*, 272, 121923. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121923>
- Yan, M., Antoni, Wang, J., Hantoko, D., & Kanchanatip, E. (2021). Numerical investigation of MSW combustion influenced by air preheating in a full-scale moving grate incinerator. *Fuel*, 285(September 2020), 119193. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119193>


 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ANEXOS

Los anexos deben ser nombrados con letras para diferenciarse unos de otros (p. ej: Anexo A, Anexo B, etc.). Estos hacen extensiva la información del contenido del trabajo realizado tales como cálculos matemáticos extensos, códigos de programación, etc. El contenido de los apéndices debe permitir a alguien externo al desarrollo del trabajo, llegar a los mismos resultados siguiendo la misma metodología complementada con la información que en este aparte reposa.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

FIRMA ESTUDIANTES



FIRMA ASESORES



FECHA ENTREGA: 22/07/2021