



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

**PROCESOS DE TERMOVALORIZACIÓN DE RESIDUOS  
SÓLIDOS**

**TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**  
**DIEGO RAMÍREZ AGUILAR**



**CDMX**

**2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**                   **Profesor: VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO**  
**VOCAL:**                           **Profesor: FRANCISCO JAVIER GARFIAS VASQUEZ**  
**SECRETARIO:**               **Profesor: HÉCTOR GARCÍA ORTEGA**  
**1er. SUPLENTE:**           **Profesora: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS**  
**2° SUPLENTE:**               **Profesor: DAVID FRAGOSO OSORIO**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LAB. 225 DEL DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ORGÁNICA, EDIFICIO B, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.**

**ASESOR DEL TEMA**

\_\_\_\_\_

Dr. Héctor García Ortega

**SUSTENTANTE**

\_\_\_\_\_

Diego Ramírez Aguilar

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN .....  | 4  |
| OBJETIVO GENERAL .....   | 5  |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 5  |
| INTRODUCCIÓN .....   | 6  |
| CAPÍTULO I. PANORAMA ACTUAL DEL MANEJO Y DESTINO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS Y SUS REPERCUSIONES SOBRE EL AMBIENTE.....  | 9  |
| CAPÍTULO II. PANORAMA ENERGÉTICO ACTUAL, EFECTOS ADVERSOS SOBRE EL AMBIENTE Y HORIZONTE DE ENERGÍAS RENOVABLES ..... | 17 |
| CAPÍTULO III. PROCESO DE TERMOVALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS   | 32 |
| III.1 Introducción y visión general del proceso .....  | 32 |
| III.2 Recolección y consumo de residuos sólidos.....   | 39 |
| III.3 Incineración de residuos sólidos .....   | 42 |
| III.4 Tratamiento y salida de gases .....  | 46 |
| III.5 Recolección y manejo de lodos y cenizas.....   | 61 |
| III.6 Generación de calor y electricidad .....   | 64 |
| CAPÍTULO IV. PRINCIPALES HALLAZGOS Y CONDICIONES DE ÉXITO DE UN PROCESO DE TERMOVALORIZACIÓN .....                   | 66 |
| CAPÍTULO V. CONCLUSIONES .....   | 77 |
| GLOSARIO DE TÉRMINOS.....  | 79 |
| BIBLIOGRAFÍA .....   | 79 |

## RESUMEN

En un proceso de termovalorización, la energía liberada por residuos sólidos puestos en combustión se transforma en energía eléctrica para el uso cotidiano humano. Las plantas que llevan a cabo este proceso se perfilan como una opción de generación energética ambientalmente viable y como un acercamiento a un modo de “economía circular”, al eliminar una fracción del desperdicio sólido humano que contamina suelos y mares alrededor del mundo y reinsertarlo en un proceso que le da un segundo ciclo de vida a estos residuos. De esta forma, se suplantán los métodos de obtención de energía tradicionales que representan una amenaza para el buen estado del medio ambiente y se mitigan los riesgos que conlleva la proliferación de basura a nivel global.

A pesar de ser una opción popular en países desarrollados con altos estándares ambientales y de seguridad, la discusión sobre las condiciones de proceso y normas ambientales bajo las que las plantas de termovalorización deben funcionar sigue latente. Esto se debe, entre algunos otros factores, a que el tratamiento incorrecto de los gases, lodos y cenizas liberados como resultado de la ignición de los residuos sólidos pueden resultar en una mayor afectación climática que aquella misma que el proceso pretende mitigar.

El propósito de este trabajo monográfico de actualización es justamente recopilar, entender y enunciar las mejores prácticas desarrolladas alrededor del mundo en los últimos años en materia de termovalorización, que funcionan como prueba y sustento de un proceso que apuesta por su gran potencial de cambio en la manera en la que se tratan los residuos sólidos urbanos y se consideran las opciones de generación de energía eléctrica. Con esto, se podrá entender de forma holística el impacto real que estas tecnologías suponen en el ambiente.

Este trabajo incluirá un acercamiento a cada una de las etapas clave del proceso: separación, selección y manejo de los residuos, combustión de los residuos, recuperación de la energía, recobro de las cenizas (ej. precipitadores electrostáticos), tratamiento del gas de escape (ej. uso de hidróxidos de calcio y

carbón activado para retirar dióxidos de azufre y metales pesados) y finalmente, generación eléctrica (ej. vapor de agua a altas temperaturas que corre activando un generador a través de turbinas de vapor).

Se abordarán referencias de otros procesos de generación eléctrica y tratamiento de residuos sólidos con el fin de proveer un panorama holístico de las ventajas, desventajas e implicaciones del proceso de termovalorización contra alternativas existentes en México y el mundo.

## **OBJETIVO GENERAL**

Estudiar y describir el proceso de termovalorización de residuos sólidos a través de un trabajo comprensible que analice cada una de sus etapas y permita identificar las condiciones óptimas de producción que han sido desarrolladas a lo largo de los últimos años.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Conocer las características de los residuos sólidos utilizados en los procesos de termovalorización y los fundamentos manejados para su discriminación.
- Analizar el riesgo de la generación de gases de combustión y entender las condiciones a las que debe ser sujeto un buen tratamiento previo a la liberación de gases.
- Describir las ventajas de valor agregado dentro del proceso (ej. remoción efectiva de basura, generación de calor, generación eléctrica, etc.).
- Analizar el impacto ambiental del proceso y compararlo contra el que tienen otras fuentes de generación de energía.

## INTRODUCCIÓN

Cada día se genera a nivel mundial un promedio de 0.74 kilogramos de basura por persona. Esto equivale a 2 mil millones de toneladas ( $2 \times 10^{12}$  kilogramos) de residuos desechados cada año<sup>1</sup>, con el 60%<sup>2</sup> de éstos siendo depositados de forma indiscriminada en espacios abiertos e invariablemente alterando el ambiente y los ecosistemas a su alrededor.

En América Latina, el promedio mundial de generación de basura por persona se ve superado por uno 33% mayor, con 0.99 kilogramos de desperdicio generado por ciudadano cada día. El número es más preocupante cuando se hace un acercamiento a México. En el país, se genera lo equivalente a 1.16 kilogramos de basura al día por ciudadano<sup>3</sup>, esto es 17% mayor al promedio de América Latina y un alarmante 56% mayor al promedio mundial.

Si se multiplica ese valor por el número de ciudadanos en el país<sup>4</sup>, se genera un resultado de 139,200,000 de kilogramos diarios de basura generada cada día sólo en México y 50.8 millones de toneladas generadas cada año. Según el Banco Mundial, alrededor de 50% de la basura generada en México es de origen orgánico, y suponiendo para este ejercicio (porque no es así), que ese desperdicio se biodegrada sin efectos adversos en los ecosistemas, México aún tendría una generación de 25.4 millones de toneladas de basura compuesta de plásticos, metales, vidrios, papel, cartón, telas, cauchos, cueros, madera, etc.

Todo este desperdicio (el total calculado de 50.8 millones de toneladas anuales) se genera cada año en México con poco o nulo incentivo de recolección, reciclaje o correcto almacenamiento. En el país se recolecta aproximadamente el 84%<sup>5</sup> de la

---

<sup>1</sup> El Banco Mundial.

<sup>2</sup> Calculado a partir de valores publicados por el Banco Mundial.

<sup>3</sup> Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development; Washington, DC: World Bank. © World Bank.

<sup>4</sup> Tomado como una aproximación de 120 millones de ciudadanos.

<sup>5</sup> Periódico La Jornada.

basura generada cada día, y aunque la tasa de reciclaje de plásticos PET es alta (alrededor del 50%)<sup>6</sup>, la relación de este contra el total de plástico es fraccionaria, y el total de plástico dentro del total de basura también es muy bajo (aproximadamente 1:10)<sup>3</sup>. Esto resulta en una oportunidad muy grande para por lo menos depositar correctamente la basura en el país y hacer un esfuerzo para valorizarla de nuevo. Pero la oportunidad aún no se ha capitalizado, 87% de los tiraderos de basura en México son a cielo abierto y un 13% son rellenos sanitarios<sup>7</sup>, además, gran parte de la basura recolectada en México termina siendo mal depositada, ocasionando que el 70%<sup>8</sup> de la basura en el país aún termine contaminando ecosistemas y representando un riesgo para la flora, la fauna y la vida humana.

Una posible solución a este problema, además de un cambio en la infraestructura y cultura frente al problema de residuos de este país, es la introducción de plantas de termovalorización. Estas plantas, crecientemente populares en el mundo, le adjudican un valor energético a la basura por su capacidad de generación eléctrica y consecuentemente incentivan el aprovechamiento de los residuos sólidos concediéndoles un segundo valor de existencia.

Resulta irremediable hablar del sector energético en México y en el mundo para entender cuál es el valor agregado sistémico de estas plantas de generación de energía y porqué su existencia sigue siendo tan controversial en países como México, cuando la evidencia muestra que el país tiene dificultades en su manejo de basura, y fuertemente aceptadas en naciones europeas con las mejores prácticas de tratamiento de basura, como lo son Suecia, Noruega y Alemania, cuando esencialmente su función es transformar un producto de poco o nulo valor actual (la basura no reciclable) en una comodidad tan importante para los seres humanos (la electricidad).

El consumo de energía eléctrica se ha vuelto una actividad fundamental para la cotidianidad humana. Día con día se están buscando distintas e innovadoras formas

---

<sup>6</sup> El Economista.

<sup>7</sup> Gobierno de México.

<sup>8</sup> El Universal.



de obtenerla a un precio más competitivo y en un ambiente más limpio, siguiendo la tendencia de prevención del calentamiento global por la extracción y quema de combustibles fósiles. Su consumo seguirá creciendo, se espera que el uso de electricidad en el planeta se duplique para 2050<sup>9</sup>, dado que industrias como la automotriz migrarán su producción hacia un perfil de consumo eléctrico como consecuencia de la rápida adaptación de consumidores a esta nueva tendencia. Otro factor importante será la demanda de energía en la aparición de edificios inteligentes con una creciente necesidad de aparatos eléctricos y sistemas de enfriamiento.

Esta prospectiva es atractiva principalmente para los jugadores de energía renovable, se espera que a partir de 2035 éstos cubran el 50% de la demanda eléctrica<sup>9</sup>. La tendencia mundial hacia una economía circular desincentiva a los generadores eléctricos tradicionales e invita a nuevos prospectos con operaciones más eficientes a participar en uno de los mercados más atractivos del mundo.

Es aquí donde los procesos de termovalorización tienen un doble valor agregado:

1. Reducir el riesgo latente que presenta la contaminación en el mundo, por las incesantes malas prácticas y depósitos no controlados de basura que ponen en riesgo a los ecosistemas y a la salud de animales y seres humanos.
2. Generar energía de forma limpia y rentable con miras hacia una creciente demanda energética que atrae a diferentes e innovadores jugadores que presentan su propuesta de valor para cubrir la demanda de manera ecológica.

El reto de la industria de termovalorización será atenerse a las mejores prácticas y más altos estándares de calidad y condiciones de proceso que le aseguren convertirse en una alternativa viable de generación de energía eléctrica tanto económica como ambientalmente.

---

<sup>9</sup> McKinsey & Company.

## **CAPÍTULO I. PANORAMA ACTUAL DEL MANEJO Y DESTINO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS Y SUS REPERCUSIONES SOBRE EL AMBIENTE**

Sin la infraestructura, el incentivo y la educación necesaria, la gestión de la generación de basura en México y en el mundo es una de las mayores amenazas que enfrenta la conservación ambiental. Alrededor de dos terceras partes<sup>10</sup> de las cerca de 2 mil millones de toneladas de desperdicio generado a nivel mundial cada año, lo generan países en vías de desarrollo, y el 90% de los residuos sólidos en estos países son depositados en áreas no reguladas<sup>11</sup>, contaminando suelos, aguas y dañando ecosistemas. Es común también que los residuos sean quemados en espacios abiertos, liberando gas metano y otras sustancias tóxicas al medio ambiente y propagándose por el flujo natural del aire. Se calcula que alrededor del 40% de todos los desechos del planeta se encuentran en vertederos ilegales o de cielo abierto que dan servicio hasta a 4,000 millones de personas (más del 50% de la población mundial), terminando invariablemente dispersos de varias formas en el ambiente y sus ecosistemas<sup>12</sup>. En el océano, por ejemplo, cada año terminan 8 millones de toneladas métricas de desperdicio, lo equivalente a 5 bolsas de plástico por cada pie de costa alrededor de todo el mundo<sup>13</sup>.

El plástico es uno de los materiales de mayor preocupación para el mundo, a pesar de que únicamente representa el 12% de la generación de basura a nivel mundial (242 millones de toneladas anuales)<sup>10</sup>. Este material es uno de los más grandes focos por su capacidad de acumular sustancias tóxicas, descomponerse (no biodegradarse) y diseminarse alrededor del mundo por cientos o miles de años. Aún destinando todo el esfuerzo al reciclaje de este material, éste representa únicamente 12% de la producción de basura, lo que significa que, si hoy se recicla el 9% a nivel global, aun reciclando el 50, 60, o 90% se estaría dejando aparte la fracción de la producción de basura más alta, por lo que el esfuerzo en reciclaje debe ser visto de

---

<sup>10</sup> El Banco Mundial.

<sup>11</sup> El Banco Mundial.

<sup>12</sup> El Banco Mundial.

<sup>13</sup> National Geographic.

forma completa sobre la reutilización de todos los materiales y no solo los más dañinos.

Todo es prioritario, no se debe discriminar por cualidades. Algunos residuos son preocupantes por sus características fisicoquímicas, como el plástico y los metales, y otros por sus cantidades, como las redes de pesca, o los desperdicios de comida, que, aunque no se juzgan tan nocivos por ser orgánicos, su descomposición incorrecta puede ser la causa de muchas enfermedades.

Pero aun así la clave no está en el reciclaje, al profundizar se llega a la respuesta obviada, el problema debe atacarse desde el consumo. Annie Leonard en su aclamado libro “La Historia de las Cosas” menciona que aproximadamente el 99% de todo lo usado termina en la basura en menos de 6 meses, tiempo en el que la industria de reciclaje y composta de primer mundo logra captar un tercio de estos residuos para darles una segunda vida. Pero al recordar que sólo una tercera parte de la basura a nivel mundial es generada por estas naciones<sup>10</sup>, se le daría un segundo propósito a únicamente alrededor del 11% de los residuos totales generados a nivel mundial; ya que la aportación de los países en vías de desarrollo es mucho menor, al solamente reutilizar y reciclar un promedio de 4% de la basura que generan.

Según el Banco Mundial, la basura alrededor del planeta se reparte se esta forma:

- Residuos controlados: 13.5% en reciclaje, 5.5% utilizado para composta, 11% en ciclo de termovalorización, 4% en rellenos sanitarios controlados y 7% en rellenos con recolección de gases de efecto invernadero.
- Residuos no controlados: 25% en rellenos sanitarios no controlados, 33% en tiraderos al aire libre y 1% en lugares no especificados. Lo que quiere decir que alrededor del 59% de la basura en el mundo tiene acceso ilimitado a contaminar ecosistemas alrededor del mundo.

Esto es una amenaza real no sólo hacia el planeta sino también hacia la seguridad y la salud de las personas, potencializando la difusión de enfermedades y el riesgo de

incendios no controlables. Algunos de los riesgos que enfrentan los seres humanos y el ambiente con un manejo de basura inadecuado son:

- 1. Pérdida de hábitats naturales:** Conforme se acumulan los desechos, la estructura de hábitats puede modificarse, los niveles de luz y oxígeno pueden reducirse hasta deteriorar los hábitats de aguas abiertas. A medida que se modifica la estructura física de los ecosistemas, se modifica también la capacidad de éstos para albergar especies. Por ejemplo, la degradación de los arrecifes de coral a nivel mundial deteriora cada vez más la posibilidad de supervivencia de una gran variedad de invertebrados, peces y vertebrados que dependen de este recurso limitado, incluidas muchas especies en peligro de extinción<sup>14</sup>.
- 2. Contaminación química de cuerpos de agua y especies marinas:** El impacto químico más importante está asociado directamente a la acumulación y transporte de contaminantes tóxicos y bioacumulables. Estos contaminantes son ingeridos y entran en la cadena alimenticia acumulándose conforme ésta continúa. Se ha encontrado que los desechos de plástico en el agua acumulan contaminantes en concentraciones de órdenes de magnitud de miles a millones de veces mayores que el ambiente circundante<sup>14</sup>, siendo un mecanismo de transporte global para los contaminantes de riesgo hacia la cadena alimenticia.

Los contaminantes acumulados en la superficie de las partículas de plástico, así como los que están dentro del mismo, pueden liberarse al medio ambiente cuando el material se descompone en partículas más pequeñas como resultado de la radiación ultravioleta, las fuerzas mecánicas y la intemperie. El tamaño y movilidad de estos fragmentos aumentan el riesgo de difusión de los residuos en el ambiente y ocasionan una continua e irremediable contaminación química en el planeta.

- 3. Contaminación biológica de la cadena alimenticia:** Quizá una de las consecuencias del manejo inadecuado de basura más mediáticas que hay, por las constantes fotos de animales fallecidos en playas y mares con cantidades

---

<sup>14</sup> Agencia de Protección del Medio Ambiente (EUA).

preocupantes de desechos plásticos en el estómago, la contaminación biológica en la cadena alimenticia afecta adversamente a al menos 267 especies en todo el mundo. Entre ellas, al 86% de las tortugas marinas, 44% de las aves marinas y 43% de los mamíferos marinos a nivel mundial<sup>14</sup>. Estos porcentajes son realmente preocupantes si se toma en cuenta la irreversibilidad del impacto creado.

Los problemas de animales ligados a la ingestión de plásticos incluyen heridas internas y externas, deterioro en la capacidad de alimentación, bloqueo del sistema digestivo, disminución de movilidad y capacidad de evitar depredadores (que a su vez son contaminados por estos desechos) e incluso disminución de la capacidad reproductiva, un enorme problema si se toma en cuenta la reducción ya existente en la población de animales por sofocaciones y muertes tóxicas. Además, innumerables especies mueren cada año a cuenta de enredos e inmovilizaciones por este tipo de basura. Finalmente, el problema no termina cuando el animal fallece, los desechos siguen acumulándose en la cadena alimenticias al ser ingeridos por depredadores para continuar afectando a especies dentro y fuera de su ecosistema.

- 4. Deterioro de la calidad de suelos y aguas:** Es sabido que el agua es un excelente solvente, y por lo tanto un ideal y peligroso transportador de sustancias y gases tóxicos. Aunque pareciera que el foco de riesgo por la incesante generación de basura está en el mar, se puede ver que existen afectaciones importantes para la vida en tierra también. El agua contaminada se filtra diariamente en la superficie para afectar el crecimiento de plantas y cultivos. La calidad fértil de los suelos se ve comprometida y la cantidad de áreas disponibles para cultivos también.

El desgaste de los suelos es un problema importante para la industria agraria, año con año la demanda de alimentos del campo incrementa, pero la cantidad de suelos fértiles disminuye. Animales silvestres y de granja (que posteriormente serán usados como alimento) se alimentan de estos cultivos. Agricultores a su

vez, recogen cultivos contaminados que pueden ser progresivamente distribuidos y vendidos en supermercados alrededor del mundo.

**5. Afectación de actividades humanas:** Por ahora se han mencionado únicamente afectaciones directas del manejo inadecuado de residuos. La contaminación del medio ambiente y la muerte de especies marinas y terrestres a causa de confundir desechos por comida parecen prácticamente obvias y lamentablemente ajenas a las actividades que realizan los seres humanos.

La percepción de que todo esto pasa fuera del círculo humano es preocupante. Sobre todo, cuando existen consecuencias importantes para el comercio, la navegación, el turismo e incluso el panorama urbano. La disminución de animales marítimos por esta contaminación ocasiona que año con año la cantidad y calidad de los animales disponibles para la industria pesquera sea cada vez más limitada (esto sin tomar en cuenta que esta industria es también parte de su propio problema, dejando redes de pesca en el océano que invariablemente limitan estos recursos) y por lo tanto existe un deterioro en la capacidad mercantil de comerciantes pesqueros<sup>14</sup>.

Grandes restos de basura en el agua pueden ocasionar daños a hélices y tomas de motores para navíos que circulan en aguas contaminadas, limitando rutas de cabotaje y originando costos importantes para la industria. La basura también reduce la atraktividad y valor recreacional de ríos y playas. Año con año se destinan miles de millones de dólares a nivel mundial para la limpieza de playas y en la misma magnitud se pierden oportunidades de crecimiento en la industria del turismo a causa de la disminución de visitas a estos lugares.

En el espacio urbano existen consecuencias directas también. Tomando como ejemplo la Ciudad de México, el 50% de las inundaciones en la metrópoli son causadas por basura que se encuentra estancada en las tuberías de la urbe<sup>15</sup>. Esto afecta constantemente el tránsito de la ciudad, pone en peligro a peatones y

---

<sup>15</sup> La Jornada.

crea pérdidas importantes para conductores y aseguradoras por el abandono y pérdida total de vehículos en las inundaciones.

**6. Deterioro de la seguridad y salud de los seres humanos:** Finalmente la seguridad y salud de los seres humanos, y estos dos temas se describen de manera ligada porque no son mutuamente excluyentes. El depósito indiscriminado de basura puede ser causa también de importantes enfermedades, intoxicaciones y riesgos para las personas. Los tiraderos de basura se vuelven focos de reproducción de bacterias que inminentemente encuentran su salida a otros ecosistemas a través de cuerpos de agua (que también pueden ocasionar infiltraciones en los suelos) o el aire. Convirtiéndose en un detonante importante para la diseminación de enfermedades.

En cuanto a bioacumulación de residuos y toxinas, los seres humanos también corren un riesgo al formar parte de la cadena alimenticia. Como se menciona anteriormente, el plástico tiene una capacidad adsorbente importante de sustancias tóxicas, y con el tiempo se rompe en unidades más pequeñas que se involucran junto con metales tóxicos, como el mercurio y el plomo, en la cadena alimenticia. Así, se integran desde en los animales marinos más pequeños hasta en los cuerpos más grandes, con una alta población marítima contaminada por estos residuos.

Es importante recordar que estas toxinas son bioacumulables, por lo que se depositan en el cuerpo y pueden tardar años en salir. El plomo, el mercurio y el DEHA (componente liberado por algunas botellas de plástico al deshacerse), pueden continuamente e incrementalmente ocasionar problemas en el desarrollo y en la función de los órganos, como el cerebro, hígado y riñones. Así, afectan sistemas fundamentales en el cuerpo humano como el digestivo, inmunológico, reproductivo y nervioso, y crean afectaciones irreversibles.

Se ha creado una percepción errónea de que la mejor forma de evitar problemas asociados a la difusión de basura es la quema de la misma. La ignición de basura en espacios abiertos contamina gravemente el aire por la liberación de sustancias

tóxicas al ambiente, y puede ocasionar enfermedades del corazón y riesgo de cáncer en los seres humanos. La quema indiscriminada también puede ocasionar importantes incendios forestales que acaban con ecosistemas fundamentales para el desarrollo de comunidades e incluso terminan con colectividades enteras.

Habiendo identificado que estos problemas no son ajenos a la vida diaria, se pueden analizar las repercusiones importantes y medibles que las malas prácticas en la producción y manejo de basura pueden tener en las actividades, seguridad y salud de los seres humanos de forma constante y directa. Buscar maneras de mitigar estos daños han dejado de ser un lujo y han pasado a ser una necesidad para el bienestar de los seres humanos y el del planeta.

Impulsado por la incesante urbanización y crecimiento poblacional, el panorama de generación de basura para 2050 es claro, si no se toma acción inmediata, se espera que se desechen 3.4 miles de millones de toneladas anuales<sup>12</sup> a nivel mundial, un aumento del 70% respecto a los niveles que se han generado en los últimos años. Aunque la generación de basura está pronosticada claramente, no lo están las acciones concretas que se tomarán para el manejo y reducción, de este orden de desperdicio, por lo que los problemas descritos anteriormente no tendrán más que un riesgo incremental.

Es por esto por lo que el manejo de basura es un tema fundamental al hablar de conservación ambiental y preservación de los ecosistemas. Nuevas formas de gestión y almacenamiento de residuos deben surgir al mismo ritmo o por lo menos en la misma escala como soluciones a estos problemas. Si no se tienen, se deben limitar malas prácticas que incentivan el desperdicio de materiales y productos como el incesante envío de paquetes por compras en línea y los cobertores y cubiertos desechables en los servicios de comida para llevar.

Gobiernos, empresas privadas y *startups* cada día idean soluciones a estos problemas: nuevos materiales, tecnologías de reutilización, sistemas de reciclaje, etc., pero mientras el consumo continúe bajo un crecimiento demográfico importante y una educación básica restringida, se debe poner sobre la mesa restricciones más



contendientes, se debe estudiar cada posible solución y de alguna forma, si no se busca frenar de manera importante la producción de basura, entonces incentivar la práctica de recolección y reutilización de estos desperdicios para hacerlos parte de una economía circular.

Este es solo un pronóstico de primer nivel sobre el riesgo de la generación y manejo de los residuos sólidos esperados en México y en el mundo. Día con día se liberan a cientos de ecosistemas vitales artículos eléctricos, plásticos, médicos, etc., que quedan distribuidos en magnitudes de cientos de miles de toneladas de forma indiscriminada. Todos estos artículos a su vez se descomponen en una inmensidad de sustancias tóxicas que ponen en riesgo la vida marina, terrestre y humana (si se busca calificar de forma aislada) y enumerarlas junto a sus repercusiones podrían ser el tema de un sinnúmero de artículos de investigación, que por ahora no son el foco de este trabajo.

El propósito es identificar y reconocer que la generación de basura es un problema real, atacarlo supone una inversión importante y un esfuerzo mundial en conjunto. No es un problema de industrias, es un problema actitudinal, mientras no se cambie la mentalidad fuera de un espectro de consumo eterno, no se podrá realmente mitigar esta generación de inmundicias. Una vez que este problema siga sin atacarse, es importante separar la primera etapa de generación, para actuar sobre la segunda: el manejo de la basura.

Ya que existe una generación de basura creciente e incesante, ¿cómo se manejará? Si no existe la infraestructura, el incentivo o la educación necesaria para reciclar, reutilizar e incluso depositar adecuadamente artículos que han perdido su valor en el mercado local y no existen las tecnologías escalables (escalables es la palabra clave, dado que existen tecnologías que recuperan estos materiales en una escala diminuta al problema), se debe buscar una solución alterna a este problema.

La termovalorización en México y el mundo se presenta como una alternativa atractiva al problema de la diseminación de residuos sólidos, con una propuesta de valor en materia económica y ambiental. De ahí la importancia de estudiar bien el

proceso y entender el enorme potencial sustentable que implica, al remover desechos del planeta a la par de generar un bien fundamental como es la energía eléctrica.

Un análisis holístico del proceso y sus implicaciones en el ambiente permitirán llegar a una determinación. Con un enfoque en la etapa controversial: analizar los efectos secundarios de este proceso y los gases que se liberan a la atmósfera, se comprobará la factibilidad ambiental frente a otros procesos de manejo de basura y otras fuentes de generación de energía.

## **CAPÍTULO II. PANORAMA ENERGÉTICO ACTUAL, EFECTOS ADVERSOS SOBRE EL AMBIENTE Y HORIZONTE DE ENERGÍAS RENOVABLES**

Además del manejo de basura, otro gran reto para mitigar la afectación ambiental y el cambio climático a la par de sostener las “necesidades” de consumo de los seres humanos es la claridad de un panorama de generación de energía sustentable. Por muchos años el sector energético en el mundo se ha asociado, con justa razón, a procesos y proyectos altamente contaminantes, propulsores del calentamiento global. Esto se debe a que gran parte de la generación de energía a nivel mundial depende de un sistema lineal de explotación de recursos no renovables que se queman y emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera, como el dióxido de carbono y el metano.

Estos gases, (metano, dióxido de carbono, óxido nitroso y clorofluorocarbonos) aunque permiten la entrada de luz solar al planeta, inhiben la capacidad de escape del calor fuera de la atmósfera, ocasionando un aumento gradual y constante en la temperatura a nivel mundial. A medida que crece la concentración de estos gases en la atmósfera, aumentan de forma evidente sus repercusiones ambientales. Al ser la quema de hidrocarburos una de las causas predominantes de este fenómeno<sup>16</sup> y uno de los agentes responsables de aumentar la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera desde la revolución industrial, no resulta otra alternativa que buscar nuevas fuentes

---

<sup>16</sup> Agencia de Protección del Medio Ambiente (EUA).

de generación de energía limpia que puedan sustentar las necesidades humanas de consumo.

En este nuevo entorno de progresiva información y preocupación ambiental, las necesidades del mercado han cambiado. Los consumidores se han convertido en activistas por su entorno y naciones alrededor del mundo han puesto en marcha regulaciones que evitan la emisión de gases de efecto invernadero. Las consecuencias de procrastinar en este frente pueden ser desastrosas, tanto para países reluctantes al cambio como para competidores rezagados. Es de dominio público, que, si se continua al ritmo existente de contaminación del aire, la concentración de gases de efecto invernadero tendrá la capacidad de terminar con la vida como ahora existe. Éstas son solo algunas de las repercusiones del cambio climático:

**1. Descongelamiento de los polos y aumento del nivel del mar:** La temperatura está aumentando en las regiones polares del planeta, ocasionando que los glaciares se derritan a un paso acelerado y a su vez incrementen el nivel del mar, poniendo en riesgo comunidades insulares enteras y ciudades costeras. El nivel global del mar ha aumentado aproximadamente 8 pulgadas desde 1880 y se prevé que aumente entre 1 y 4 pies para 2100 como resultado de la adición paulatina del agua de los glaciares a los océanos<sup>17</sup>.

En las próximas décadas, las mareas altas y tormentas podrían combinarse con el aumento del nivel del mar y el hundimiento de la tierra para aumentar aún más las inundaciones. El aumento del nivel del mar continuará más allá de 2100 pues los océanos tardan en responder a condiciones más cálidas en la superficie de la Tierra. Por lo tanto, las aguas del océano continuarán calentándose y el nivel del mar continuará aumentando durante muchos siglos a tasas iguales o superiores que las actuales.

**2. Cambios en ecosistemas y extinción de especies:** Los cambios en el ecosistema, el calentamiento global y las múltiples intervenciones que existen día

---

<sup>17</sup> NASA.

con día en el planeta, se estima causan la muerte de entre 10,000 y 100,000 especies cada año<sup>18</sup>. Por cuenta del cambio en el entorno ambiental, gran variedad de plantas y animales deberán someterse a un proceso de adaptación que incluirá migraciones, interrupciones en la cadena alimenticia, cambios en las fuentes de nutrición, nuevas enfermedades e incluso permutaciones en su comportamiento, estos cambios ya están representando la desaparición de miles de especies incapaces de migrar o adaptarse a tiempo.

Un nuevo entorno de sequías prolongadas y precipitaciones abruptas afectará la diversidad de plantas y animales en distintas regiones y cambiará el panorama de supervivencia para muchas especies. El rango de clima cálido para algunas especies se ampliará, y el reino de climas frescos se enfrentará a hábitats reducidos y una posible extinción. En su reporte publicado en 2014, la IPCC<sup>19</sup> señaló que ya una gran cantidad de especies, tanto terrestres como acuáticas, han migrado a entornos con climas más frescos o viven en una mayor altura, alejándose del calor y las constantes inundaciones. Otras especies, en cambio, están simplemente desapareciendo a un ritmo decenas de veces más rápido que lo esperado, parcialmente debido al cambio climático y complementado por otros tipos de contaminación (como el mal manejo de residuos) y la deforestación.

- 3. Acidificación de los océanos:** Hasta el momento, los océanos han absorbido la mayor parte del calor adicional y el dióxido de carbono en el planeta como consecuencia del cambio climático. Al aumentar la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire, éste es absorbido por el agua, ya sea en la forma de lluvia ácida o directamente en los cuerpos de agua, ocasionando que la concentración de iones y el potencial de hidrógeno (pH) del líquido cambie y por lo tanto las condiciones de subsistencia para la vida marina. Esta acidificación, aunada al aumento de la temperatura en el agua, produce efectos fuertemente adversos para los peces,

---

<sup>18</sup> Fondo Mundial para la Naturaleza.

<sup>19</sup> Por su nombre “Intergovernmental Panel on Climate Change” – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

algas, corales y demás animales que no pueden subsistir en otro entorno<sup>20</sup>. Los corales, los mariscos y el fitoplancton, que son la base de la cadena alimentaria, están particularmente en riesgo.

Las temperaturas del agua del mar por encima del promedio están ocasionando el blanqueamiento de los arrecifes de coral, que al blanquearse comienzan a morir lentamente. Los eventos de blanqueo global más largos registrados han estado azotando la Gran Barrera de Coral en una escala sin precedentes. La decoloración regional severa solía golpear un arrecife aproximadamente cada 27 años. Desde 1980, el ritmo se ha acelerado a cada seis, cuando incluso en las mejores condiciones, los arrecifes muy dañados tardan al menos 10 años en recuperarse. La Gran Barrera de Coral, golpeada ya dos años seguidos, puede que nunca se recupere<sup>21</sup>.

**4. Intensidad de fenómenos naturales:** Gran parte de la comunidad científica concuerda que la intensidad y grado de violencia de huracanes, ciclones, tifones, sequías, inundaciones, lluvias y tormentas de nieve ha aumentado debido al calentamiento global, causando más muertes, víctimas y daños materiales que nunca. La intensidad, frecuencia y duración de los huracanes del Atlántico norte, así como la frecuencia de los huracanes categoría 4 y 5 (los más violentos), han aumentado desde principios de los años ochenta, como todos los indicadores del cambio climático.

Según las proyecciones, la intensidad de las tormentas y las tasas de lluvia asociadas con los huracanes aumentarán a medida que el clima continúa calentándose<sup>22</sup>. El calentamiento global está creando condiciones que pueden llevar a huracanes más poderosos y la sólida evidencia científica muestra que también puede aumentar ciertos tipos de fenómenos meteorológicos extremos, incluidas las olas de calor, las inundaciones costeras, los eventos de precipitación extrema y las sequías más graves.

---

<sup>20</sup> Acciona.

<sup>21</sup> National Geographic.

<sup>22</sup> Consejo para la Defensa de los Recursos Naturales (EUA).

**5. Alteración de las estaciones y producción de alimentos:** Uno de los efectos más conocidos del calentamiento global es su afectación en las estaciones del año. Para algunas partes del mundo esto significará inviernos más cortos y para otras, veranos más calientes e incesantes. Ya que el cambio climático es una imposición humana en un ambiente naturalmente cambiante, la respuesta del aumento de la temperatura no será constante en los próximos años y las estaciones podrán alargarse o hacerse más cortas dependiendo de la respuesta de infinidad de factores ambientales al calentamiento global.

Esta incertidumbre climática vuelve difícil preparar la temporada de cosecha y alimentación de animales de granja en muchas partes del mundo y la hace imposible en otras al hacer más propensas las sequías, las olas de calor y las inundaciones. El calor crea un entorno más apto para la recolección y retención de agua en las nubes, por lo que las lluvias están siendo también cada vez más intensas, causando cambios abruptos en el clima. De esta forma, geografías con condiciones predominantemente lluviosas, están recibiendo más y más precipitación, mientras que áreas normalmente áridas han sufrido fuertes sequías.

Todos estos factores afectan la actividad económica y ponen en riesgo la supervivencia de comunidades en varias partes del mundo. El calentamiento global tiene el potencial de obstaculizar seriamente el ya complejo suministro de alimentos de los seres humanos, elevando sus costos de producción y volviendo más compleja la elaboración de cualquier materia prima.

**6. Riesgos a la salud:** El cambio climático tiene implicaciones significativas para la salud de todos los seres en la Tierra. La contaminación del aire y la atmósfera caliente en áreas urbanas, provocan condiciones que atrapan y acrecientan la cantidad de esmog en el ambiente. Esto es porque el ozono, elemento principal de la neblina tóxica, se forma mediante la interacción de luz solar con las partículas que conforman la contaminación del aire. Estas condiciones provocan que las partículas de ozono aumenten rápido su concentración y ocasionen enfermedades como asma, cáncer en los pulmones y problemas en el corazón a las personas que lo respiran. Lo mismo con el alza en temperaturas, que aumenta

significativamente la cantidad de polen en el aire y ocasiona temporadas de alergia prolongadas.

Condiciones atípicas en el clima también pueden afectar las tasas de mortalidad en ciertas comunidades, sobre todo aquellas en las que la infraestructura no es suficiente para soportar cambios en el ambiente. Demografías que no están acostumbradas a recibir ondas de calor o precipitaciones pueden sufrir de forma importante al no tener acceso a refugios adecuados. Quizá este problema en una primera instancia no suene tan devastador, pero año con año el calor intenso, a través de la deshidratación, la hipertermia y enfermedades cardiovasculares y renales, mata más personas en Estados Unidos que la suma total de muertes a causa de huracanes, tornados, inundaciones y rayos, eventos más mediáticos y para los que las personas se preparan con mayor antelación.

- 7. Migraciones humanas masivas:** Aunque el número esperado aún no es certero, parece inminente que el cambio en las condiciones climáticas por el calentamiento global obligue la migración de millones de refugiados en búsqueda de nuevos hogares hacia regiones menos impactadas por el impacto climático. Un evento de gran preocupación para las todas las naciones, ya que, aunque no sean consolidado expectativas, este número probablemente rondará los cientos de millones de personas.
- 8. Cambio persistente en las condiciones de vida:** Ya que el cambio climático es consecuencia directa de una alta concentración de metano, dióxido de carbono, óxido nitroso, vapor de agua y clorofluorocarbonos en la atmósfera, sus repercusiones están atadas a su ciclo de vida en el planeta, y por lo tanto sus efectos dependen de la persistencia de estos componentes en el aire. Es por esta constante acumulación que se estima que los gases que se emiten hoy podrán tener efectos por hasta siglos posteriores dentro de la atmósfera terrestre.

De acuerdo con la IPCC, en 2014, la generación de electricidad y producción de calor fueron los emisores más importantes de gases de efecto invernadero con 25% de las emisiones a nivel global, cuando otras clases de energía sumaban únicamente

el 10% de la generación de estos gases. Las emisiones generadas por el transporte fueron también uno de los principales emisores de estos gases, con 14% de las emisiones<sup>16</sup>. Si se toman como referencia los países europeos, donde el 50%<sup>23</sup> de los gases producidos por este último grupo se relacionan a emisiones por automóviles, uno de los principales focos de innovación y disrupción por las nuevas tecnologías eléctricas, se tendría como resultado que, al solo afinar las fuentes de generación eléctrica, existiría el potencial de mitigar alrededor de un tercio de los gases de efecto invernadero (25% de generación de electricidad y calor, y 7% relacionado al tránsito vial) y evitar la sobreexplotación de los recursos limitados del planeta.

Es por esto por lo que se ha desarrollado un enfoque global en la gestión y generación de energía limpia alrededor del mundo. Donde se invita a nuevos jugadores con procesos disruptivos e innovadores a que aporten valor al sector energético y permitan el crecimiento sostenible de la demanda, sobre todo eléctrica, a nivel mundial. Aunque existen varias alternativas de generación de energía limpia, como biomasa, biogás, geotérmica y marina; hay tres procesos de generación que se espera se lleven alrededor del 50% del mercado de generación de energía eléctrica renovable en los siguientes 15 años<sup>24</sup>:

1. **Energía Solar:** La generación de energía eléctrica a través de la capitalización de los rayos solares es por mucho la opción con el mejor panorama de crecimiento. Tiene además un valor agregado alto al ser integrable directamente en hogares, una cualidad que no acompaña a todas las alternativas de energía renovable. Desde 2010, la producción de energía eléctrica por este medio ha crecido a un increíble paso de 30-40% por año<sup>25</sup>. Aunque dentro de esta categoría los paneles fotovoltaicos son generalmente la vertiente más conocida, se está volviendo crecientemente popular la energía solar térmica. Ambos procesos tienen el mismo

---

<sup>23</sup> Agencia Europea del Medio Ambiente.

<sup>24</sup> McKinsey & Company.

<sup>25</sup> Agencia Internacional de Energías Renovables.



insumo (luz solar) y la misma consecuencia (electricidad), pero los procesos son muy distintos.

Para el primero, el de celdas fotovoltaicas, el proceso en primer nivel pareciera sencillo pero la tecnología detrás de convertir luz solar en energía a través de semiconductores ha estado en constante evolución y aumento de eficiencia durante los últimos años. Las celdas solares están hechas de circuitos integrados que aprovechan el efecto fotoeléctrico para que cuando un fotón golpea un átomo del material, un electrón absorba su energía y sea liberado para fluir sobre las celdas y generar electricidad. La energía solar térmica, en cambio, canaliza la luz recibida del sol a través de espejos, que aumentan la temperatura de un líquido, generalmente agua, para hacerla pasar a su estado gaseoso y posteriormente enviar el vapor a una turbina que producirá electricidad a través de trabajo mecánico.

Aunque estas dos atractivas alternativas no ocasionan desgaste en los recursos naturales ni tienen efectos secundarios de contaminación en su proceso, tienen dos grandes dependencias: la existencia de luz solar y la disponibilidad de servicios de almacenamiento de energía eficientes que puedan acumular la electricidad generada. Es tan grande el panorama de crecimiento y han sido tan evidentes las mejoras en eficiencia y la disminución de costos para estos productos, que sin duda las tecnologías complementarias como lo son las baterías de almacenamiento podrán desarrollarse a la par de un producto tan revolucionario.

El reto: Cada año se producen miles de toneladas de paneles y espejos solares que cubren la superficie de la tierra para aprovechar la luz solar. En 2016, se estimaba que había alrededor de 250,000 toneladas métricas de desechos de este tipo en el mundo<sup>26</sup>. IRENA<sup>27</sup> proyectó que esta cantidad podría alcanzar las 78 millones de toneladas métricas para 2050. Este material no es fácil de reciclar

---

<sup>26</sup> Forbes.

<sup>27</sup> "International Renewable Energy Agency" – Agencia Internacional de Energías Renovables.

y requiere de procesos complejos para que se puedan reutilizar sus componentes. A pesar de esto, el incentivo es alto, ya que el material a recuperar podría superar los 15 mil millones de dólares para 2050<sup>28</sup>.

El reciclaje especializado de energía fotovoltaica será esencial para una transformación mundial hacia un futuro sustentable y económicamente viable. La creciente vida media de los equipos y su cada vez mayor eficiencia, no son ni serán esfuerzo suficiente para controlar este problema. Se deben sentar las bases institucionales para cumplir con el aumento esperado en el desperdicio fotovoltaico. Los marcos regulatorios y leyes nacionales e internacionales deben ser consistentes para evitar la tercerización de esta basura y afrontar el compromiso sustentable de forma completa.

2. **Energía Eólica:** La producción energética eólica es la consecuencia de aprovechar el movimiento del aire para generar un cambio en la posición de aspas ensambladas en una torre eólica. Estas aspas, o álabes, son impulsadas por el viento, que corre de una zona de mayor a una de menor temperatura, y aprovechan su inercia para rotar y activar un generador, que transforma la energía mecánica en energía eléctrica en la cabeza de la torre.

La energía eólica, como la solar, tiene costos de operación muy bajos dado que aprovecha recursos inacabables para aprovecharlos como impulsores en la creación de energía. Su huella ambiental en producción es prácticamente nula, ya que no produce efectos secundarios sobre el planeta. A lo largo de la última década, la capacidad instalada de la energía eólica se ha triplicado<sup>29</sup>, en parte impulsado por esfuerzos importantes de China<sup>30</sup> que busca migrar su energía tradicional a renovable. Europa también es uno de sus mayores impulsores, con 100% de crecimiento de 2016 a 2017 en turbinas en tierra y con países

---

<sup>28</sup> Agencia Internacional de Energías Renovables.

<sup>29</sup> Agencia Internacional de Energías Renovables.

<sup>30</sup> National Geographic.

embajadores como Dinamarca, dependiendo casi en un 50% de esta clase de generación de energía<sup>31</sup>.

El futuro de la energía eólica es muy prometedor y su propuesta de valor muy atractiva, sobre todo en tierra, donde sus costos de inversión son significativamente más bajos. Aunque su participación actual sigue siendo menor al 10% de la generación eléctrica a nivel mundial, se espera que para 2050 las turbinas eólicas produzcan cerca del 30% de la energía total global<sup>30</sup>, únicamente por debajo de las alternativas renovables de generación solar<sup>24</sup>.

El reto: Estas turbinas representan una intervención en la vida silvestre, desde su instalación, que requiere del uso de vehículos de grandes dimensiones, hasta su operación, que supone un constante riesgo para aves que pasan por esas zonas<sup>32</sup>. Estos problemas se han mitigado con mejoras tecnológicas y planteamientos de obra más estructurados que reducen el riesgo de intrusión en la vida silvestre, pero aún existe un gran campo para trabajar.

Otros motivos de crítica atacan su esencia misma, y esto es que la falta o poca constancia del viento hace que estos aparatos gigantes sean inútiles, y hasta estorbosos a la vista, volviéndose dependientes de otros métodos de generación alterna o almacenamiento de energía.

El costo de oportunidad en el uso de tierra sigue siendo una discusión abierta, naciendo a través de la creencia de que la tierra puede ser más rentable si es usada de otra manera, aunque en muchos casos no lo es, sobre todo cuando las condiciones de viento obligan la instalación de estas estructuras en zonas aisladas de poco interés mercantil, pero en esos casos el problema se vuelve la instalación de kilómetros de conectividad eléctrica. Otra área de oportunidad para los campos eólicos es la disminución en la cantidad de ruido que emiten, siendo molestos para comunidades que viven cerca de ellas.

---

<sup>31</sup> Wind Europe.

<sup>32</sup> Departamento de Energía de Estados Unidos.

3. **Energía Hidráulica:** La energía hídrica es por mucho la fuente de energía renovable más utilizada a nivel mundial con alrededor de 16% de la energía eléctrica del planeta operada y producida de esta manera<sup>33</sup>. Incluso en México la capacidad instalada de la tecnología hidroeléctrica suma 17% de la generación del país<sup>34</sup>, aunque no cuenta con el mismo pronóstico de crecimiento que la energía solar o eólica.

El proceso interno de generación de una central hidroeléctrica es muy similar al de las turbinas eólicas, en el sentido que el principio básico de transformar energía mecánica en energía eléctrica es aplicado. Las centrales se construyen e instalan en el desnivel de cuerpos de agua voluminosos, como lagos, donde aprovechando el cauce natural del agua, se colocan tuberías o canales que centralizan el flujo del líquido para hacerlo pasar por hélices de turbinas al final de la caída. De esta manera, ocasionan el movimiento de las aspas en una turbina para generar un trabajo mecánico que activa un generador y posteriormente permite la generación de energía eléctrica.

La energía hidráulica es una de las maneras más baratas de generar energía hoy en día. Una vez construida la presa, el flujo natural del agua llena los cauces y las centrales pueden activarse para dejar el agua pasar cada que sea necesario. Su futuro se espera casi constante, con un crecimiento mucho más modesto que el de las dos energías anteriores. La evolución que ha tenido en los últimos años no rebasa los dos dígitos porcentuales, a diferencia de la energía solar y la eólica<sup>35</sup>, pero aún sigue siendo una fuente certera de generación de energía limpia, sin la desventaja de depender 100% de que los recursos naturales como los rayos solares o el viento se presenten para producir energía.

El reto: Existen tantas preocupaciones ambientales alrededor de este método de generación de energía, que se podría considerar que el proceso es más problemático de lo que vale. Aunque es cierto que su producción, per se, no

---

<sup>33</sup> Agencia Internacional de Energía.

<sup>34</sup> Forbes México.

<sup>35</sup> Agencia Internacional de Energías Renovables.

ocasiona la emisión de ninguna toxina a la atmósfera, su construcción y operación son increíblemente invasivos para el ambiente, incluso causando sequías importantes en comunidades y países colindantes por su ilimitada intervención en el curso natural del agua.

La intervención inicia desde la construcción de la presa, donde se destruye el hábitat de cientos de miles de animales para inundar un cuerpo de tierra y convertirlo en una reserva. Actividad que afecta tanto a las especies asentadas en tierra como las condiciones de vida de los peces, ya que, una vez formada la presa, se ocasionan cambios irremediables en los niveles de ríos, sus patrones de su flujo y su temperatura. Además, existen impedimentos físicos que llegan a tener los animales como el salmón, que por la construcción de las presas son incapaces de nadar río arriba y desovar como lo hacen naturalmente, u otros impedimentos ocasionados a especies que deben ajustar sus tiempos de migración.

Además de esto, la intervención de espacios naturales para forzarlos a albergar agua puede ocasionar efectos secundarios no solo sobre las especies si no sobre el ambiente mismo. Grandes cantidades de vegetación empiezan a morir y pudrirse con el paso del tiempo. Este proceso natural de descomposición produce grandes cantidades de metano, uno de los mayores contribuyentes al justamente evitado cambio climático<sup>36</sup>.

Además de las preocupaciones ambientales, las represas son causa de tensión para las comunidades que las rodean. El desplazamiento de seres vivos no discrimina entre especies, y muchas veces implica la recolocación de cientos de miles de personas, que son forzadas a dejar sus condiciones de vida actuales por la construcción de estas presas, ya sea para inundar el espacio donde residen o por motivos de seguridad. Éste último siendo otro tema importante, ya que accidentes en las presas han tomado la vida de cientos de miles de personas alrededor del mundo.

---

<sup>36</sup> National Geographic.

Una alternativa que buscaron países como Suiza fue la construcción de pequeñas hidroeléctricas que pudieran generar energía para distintas comunidades alrededor del país, pero además de que cientos de ecosistemas fueron alternados, únicamente se generó el 1% de la energía total de la nación. Un caso fallido para la generación hidráulica<sup>37</sup>.

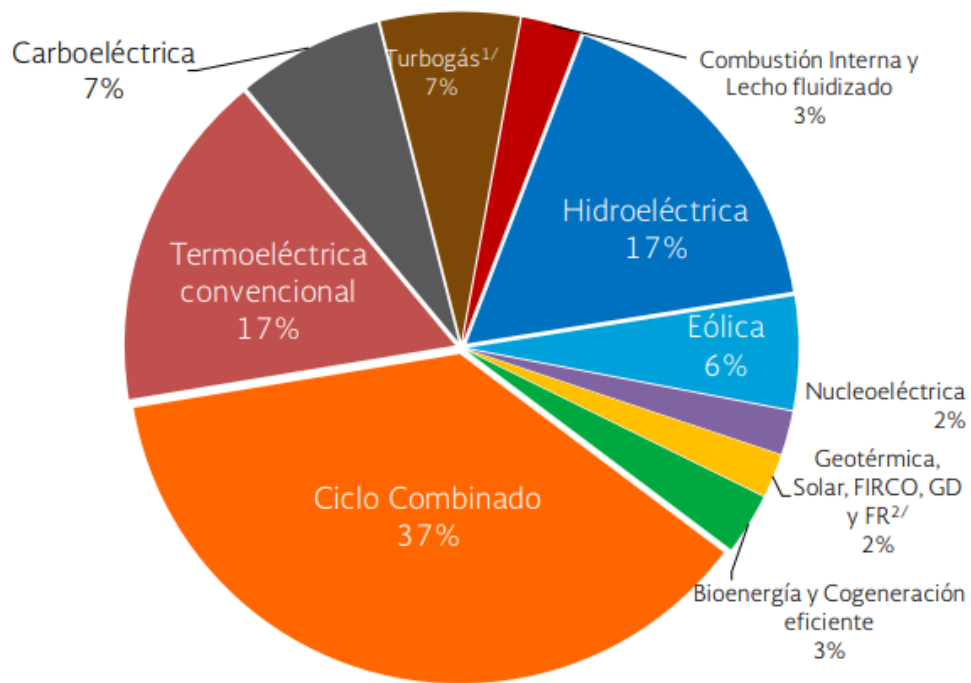
Aunque existen todavía elementos de implementación, costo y proceso por mejorar; en un balance absoluto, el futuro de las energías renovables es optimista. Países como México han estado apostando cada vez más por alternativas de generación limpia y alejándose, cuanto pueden, del método de generación eléctrica tradicional; que además de ser difícil frenarlo de golpe, por su importancia y robustez, aún tiene sus respectivas ventajas.

De acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional en México, la Figura 1 y Figura 2<sup>38</sup> muestran el panorama eléctrico presente y futuro en el país, favoreciendo ampliamente la producción de energía solar y eólica:

---

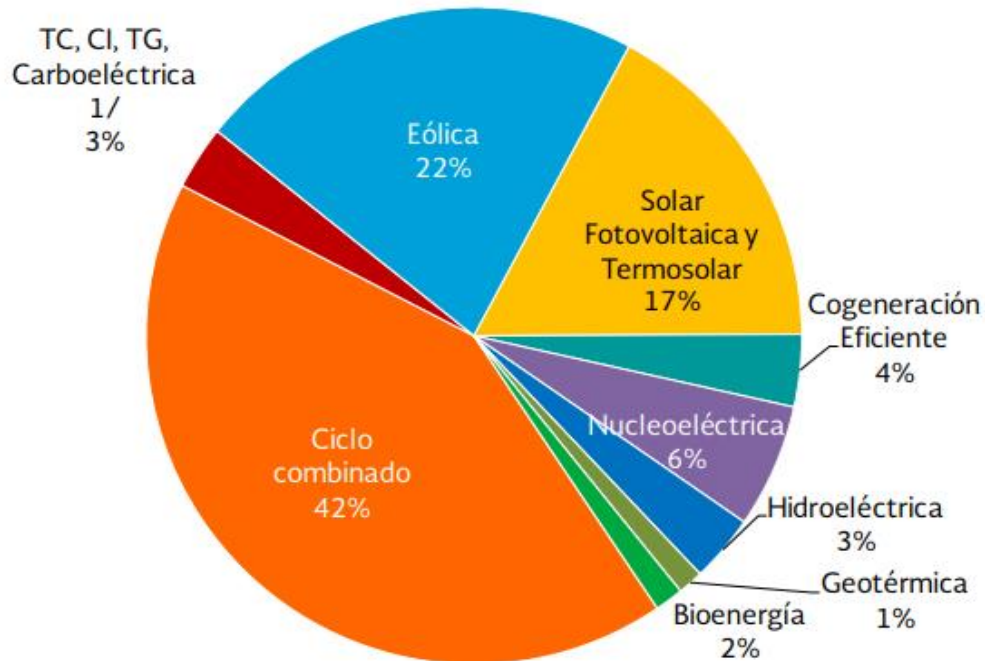
<sup>37</sup> Forbes.

<sup>38</sup> PRODESEN.



1/ Incluye plantas móviles. 2/ Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), Generación Distribuida (GD) de varias tecnologías y Frenos Regenerativos (FR). El total puede no coincidir por redondeo. Información preliminar 2017. Fuente: Elaborado por la SENER con datos de la CFE, la CRE, el CENACE y la Subsecretaría de Planeación y Transición Energética.

**Figura 1.** Capacidad instalada por tipo de tecnología 2017

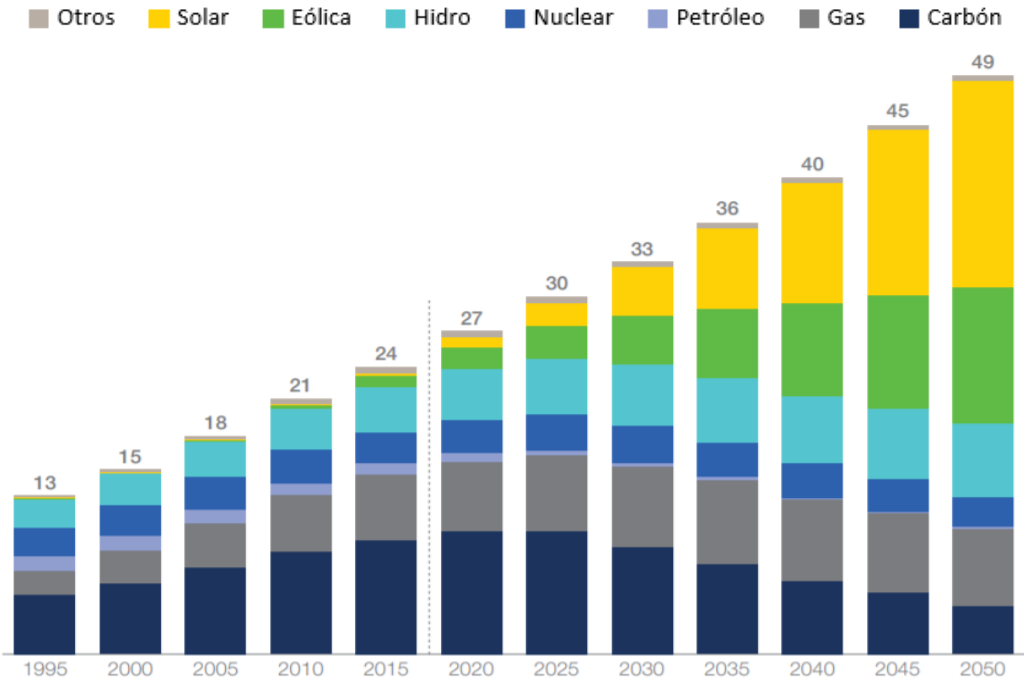


<sup>1/</sup> Combustión Interna, Turbogás, Carboeléctrica y Lecho fluidizado. Los totales pueden no coincidir por redondeo. Fuente: Elaborado por la SENER.

**Figura 2.** Capacidad adicional por tipo de tecnología 2018-2032

La producción de energía limpia se ha vuelto atractiva para los nuevos jugadores de generación eléctrica no solo por su valor ambiental y posicionamiento privilegiado en el mercado, sino por sus bajos costos de operación comparados con aquellos de las energías dependientes en la quema de hidrocarburos. Esto dado a la calidad que los define, y es que su materia de sustento son fuentes de recursos naturales. Esto, sumado a que los subsidios gubernamentales ofrecidos hacia estas tecnologías son cada vez más altos, y por su elevada eficiencia cada vez menos necesarios, vuelven el panorama de implementación de proyectos de energía limpia más optimista.

Es por estas razones que las fuentes de energía renovable vienen marchando a un paso dinámico para tomar el mercado eléctrico del futuro. Los expertos en la materia pronostican que para 2035 estas tecnologías acaparen ya el 50%<sup>24</sup> de la generación eléctrica para ser el mayor productor de energía. El panorama pronosticado para los siguientes 30 años tiene un perfil optimista para el ambiente:



**Figura 3.<sup>24</sup>** Panorama global de energía eléctrica<sup>39</sup>

<sup>39</sup> Otros = Biomasa, energía geotérmica, marítima, etc.



Es claro que la tendencia mundial no solo se inclina hacia un panorama de energía limpia, si no que promueve la propagación de la misma. Los altos niveles de consumo humano, tanto energéticos como materiales, están volviéndose un problema de primer nivel, buscar alternativas de impacto positivo tiene cada vez una compensación mayor. El área de oportunidad para cualquier tipo de tecnología que encuentre soluciones innovadoras a estos problemas es altísima, con espacio para distintos jugadores en un sector con un valor de miles de millones de dólares.

Una vez entendido y delimitado el impacto de lo que se quiere contrarrestar a través de la implementación de procesos de termovalorización, y definida la necesidad de su existencia, se puede ver cómo es que este proceso crea un valor agregado en una cadena descuidada de gestión de residuos sólidos y un sector energético anhelante de alternativas disruptivas.

### **CAPÍTULO III. PROCESO DE TERMOVALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS**

#### **III.1 Introducción y visión general del proceso**

El proceso se desarrollará de manera comprensible, tanto para personas dentro como fuera de la industria de la química, con información pública, artículos y extractos de expertos y líderes en la industria, y un profundo entendimiento de cada una de las intervenciones que suceden a lo largo del proceso de aprovechamiento de calor liberado por los residuos sólidos en la termovalorización. El proceso se presenta como una alternativa a la falta de capacidad de áreas urbanas de reducir su paso de generación de basura y el de la industria para recolectar, separar y reciclar o compostar todos los residuos municipales que se desechan día con día. La termovalorización en su proceso más popular, el de incineración, requiere mínima o nula clasificación de residuos para poder ser aprovechados como energía calorífica y eléctrica, y no compite contra soluciones de reciclaje y reutilización ya que puede (y en sus mejores prácticas debería) funcionar como ciclo posterior a estos procesos.

Países desarrollados y altamente comprometidos con el medio ambiente, a través de normas y regulaciones que limitan la generación de subproductos, obligan el reúso o

reciclaje de los mismos y por lo tanto empujan a la industria de termovalorización hacia mayores eficiencias. Ya que este proceso no compite con el reciclaje, muchos de los países con las tasas de reciclaje más altas, como Austria, Bélgica, Suiza, Alemania y los Países Bajos, también tienen altos porcentajes de basura siendo manejada a través de procesos de termovalorización y de esta forma han reducido sus residuos en vertederos casi a cero. Japón es ejemplo de un país que ha tenido gran éxito en la implementación de plantas de termovalorización con alrededor tres cuartas partes de su basura siendo manejada por este tipo de plantas. Noruega y Suiza emplean este proceso en alrededor del 50% de su basura para ser aprovechada como energía<sup>40</sup>, con el resto siendo sujeta a composta y reciclaje.

El panorama para un manejo responsable de basura no es tan brillante como el que existe para la producción de energía limpia, los incentivos para recoger chatarra y reutilizarla son bajos y la industria de reciclaje y composta no está siendo igual de agresiva que la generación de basura y el daño al medio ambiente que esto ocasiona.

Un sistema eficaz de gestión de residuos sólidos urbanos debe priorizar la prevención, reúso, reciclaje y composta de los residuos generados para que aquellos que no pueden ser aprovechados en los procesos anteriores en la velocidad y escala necesaria, lleguen a los procesos de recuperación, aprovechamiento y eliminación como lo son las plantas de termovalorización. En cuanto estos sistemas de prevención y adaptación de residuos no estén implementados, se deben poner en marcha soluciones en la escala necesaria para evitar la proliferación de basura. De esta manera se elimina la necesidad de depositar residuos en espacios abiertos y rellenos sanitarios que ponen en riesgo la salud humana, requieren de cuidado durante cientos de años y tienen un potencial muy alto de contaminar gravemente el medio ambiente.

Dentro de estos artículos y materiales difíciles de reutilizar y reciclar, se encuentran: esponjas, papel de regalo, empaques de dulces, cepillos de dientes, zapatos, bolsas

---

<sup>40</sup> Administración de Información Energética de los Estados Unidos.

de aspiradoras, empaques de alimentos grasientos, productos de reciclaje repetido, etc.<sup>41</sup> y muchos otros que si pueden ser aprovechados en el proceso de termovalorización. Además, existen varios productos que no deben ser reciclados como: productos sanitarios, jeringas, materiales de curación, productos médicos u otros que estén contaminados con sustancias tóxicas. Para este tipo de desechos es importante un proceso de recuperación que pueda valorizar lo que quedaría por cientos de años en el ambiente.

Es por esto por lo que es importante tener un plan de implementación para este tipo de procesos, que, de alguna forma, pueden monetizar estos residuos y consecuentemente reducir el alto daño que se está ocasionando al medio ambiente con los indeseables manejos de basura existentes.

Es importante aclarar que el presente trabajo recolecta las mejores prácticas de la industria de la termovalorización y las describe y propone como una alternativa de manejo de basura tomando en cuenta que se siguen las mejores prácticas descritas a lo largo del trabajo en manejo de gases y subproductos, con estándares tecnológicos y regulaciones ambientales de primer nivel. El trabajo no pretende calificar como sustentables todos los procesos de termovalorización que existen a nivel global que muchas veces se atienen a regulaciones y normativas decadentes que pudieran afectar el medio ambiente y las condiciones de vida de las personas.

Algunas plantas de incineración arcaicas, mal planeadas y con estándares pobres de calidad han sido motivo de crítica y provocado problemas en la salud de muchas personas. Estas plantas suponen un riesgo al medio ambiente y su marcha debe ser detenida para mejorar su eficiencia en transformación energética y tratamiento de subproductos para cumplir con los estándares más rigurosos de calidad, antes de recurrir a seguir invirtiendo en nuevas plantas de termovalorización.

Dentro de la industria de la termovalorización, cada planta podrá generar una cantidad distinta de energía y subproductos a partir de procesos que fluctuarán en complejidad y sistemas, pero su curso de aprovechamiento de residuos primario

---

<sup>41</sup> Confederación Europea de Plantas de Termovalorización.

debe ser el mismo y sus prioridades deberán radicar en aumentar la eficiencia de recuperación de residuos para la generación eléctrica y reducción en la existencia de subproductos.

En una visión de alto nivel, y tomando en cuenta algunas fluctuaciones en las miles de plantas a nivel mundial, el proceso de generación de energía consta de dos etapas de manejo de basura, seguida por la incineración de residuos con fases de tratamiento de subproductos, y finaliza en la generación de productos de valor energético.

Estos pasos se categorizarán de la siguiente forma:

Recolección y consumo de residuos sólidos:

1. Recolección: Los residuos sólidos se tiran desde los camiones de basura a un depósito cerrado centro de la planta.
2. Homologación y depósito en incineradores: Un recogedor o garra robótica toma estos desechos y los deposita en la cámara de combustión.

Incineración de residuos sólidos:

3. Incineración: La basura se quema en un parrilla de combustión, liberando gases de combustión de alta temperatura dado el poder calorífico de los elementos que componen los residuos.

Tratamiento y salida de gases:

4. Proceso de limpieza de gases: Un sistema de control de contaminación del aire elimina los contaminantes del gas que fue generado por los desechos. Asegurando que tiene las condiciones óptimas de liberación de estos al ambiente.

Recolección y manejo de lodos y cenizas:

5. Reúso y depósito de lodos y cenizas: Las cenizas y demás subproductos se recogen en los fondos del proceso para reutilizarse en otros procesos industriales o depositarse en condiciones reguladas.

Generación de calor y electricidad:

6. Generación de vapor: El calor de los gases transforma agua en vapor sobrecalentado en los intercambiadores de calor.
7. Generación de energía eléctrica y calorífica: El vapor de alta temperatura y presión generado en el proceso pasa por un generador de turbina, haciendo girar sus aspas y produciendo electricidad. El calor conservado por este vapor después de la generación eléctrica es aprovechado como calor para hogares.

Antes de hacer un acercamiento en las partes específicas del proceso, se describirá de forma completa y cualitativa la red de producción de una planta de termovalorización para posteriormente facilitar la comprensión de detalles.

El proceso inicia una vez que los camiones de transportación de basura descargan los residuos en la fosa dentro de la planta a través de compuertas que lleven a la fosa. Este depósito debe contener una profundidad mínima de material residual para que una garra robótica sea capaz de adentrarse en los residuos y levantar la basura que será colocada en el incinerador.

Una vez la garra, en constante operación, suelte la basura en el ducto que lleva al horno, la basura homogeneizada será incinerada en planchas para convertirse en humo de alta temperatura que correrá a través de las paredes del horno mientras transfiere su calor a un flujo de agua que corre en tubos adyacentes (como intercambiadores de calor) para convertirse en vapor sobrecalentado. La fracción de basura que no haya sido volatilizada se recoge en la base del proceso como subproducto y se le da un trato de saneamiento y reutilización o depósito posterior.

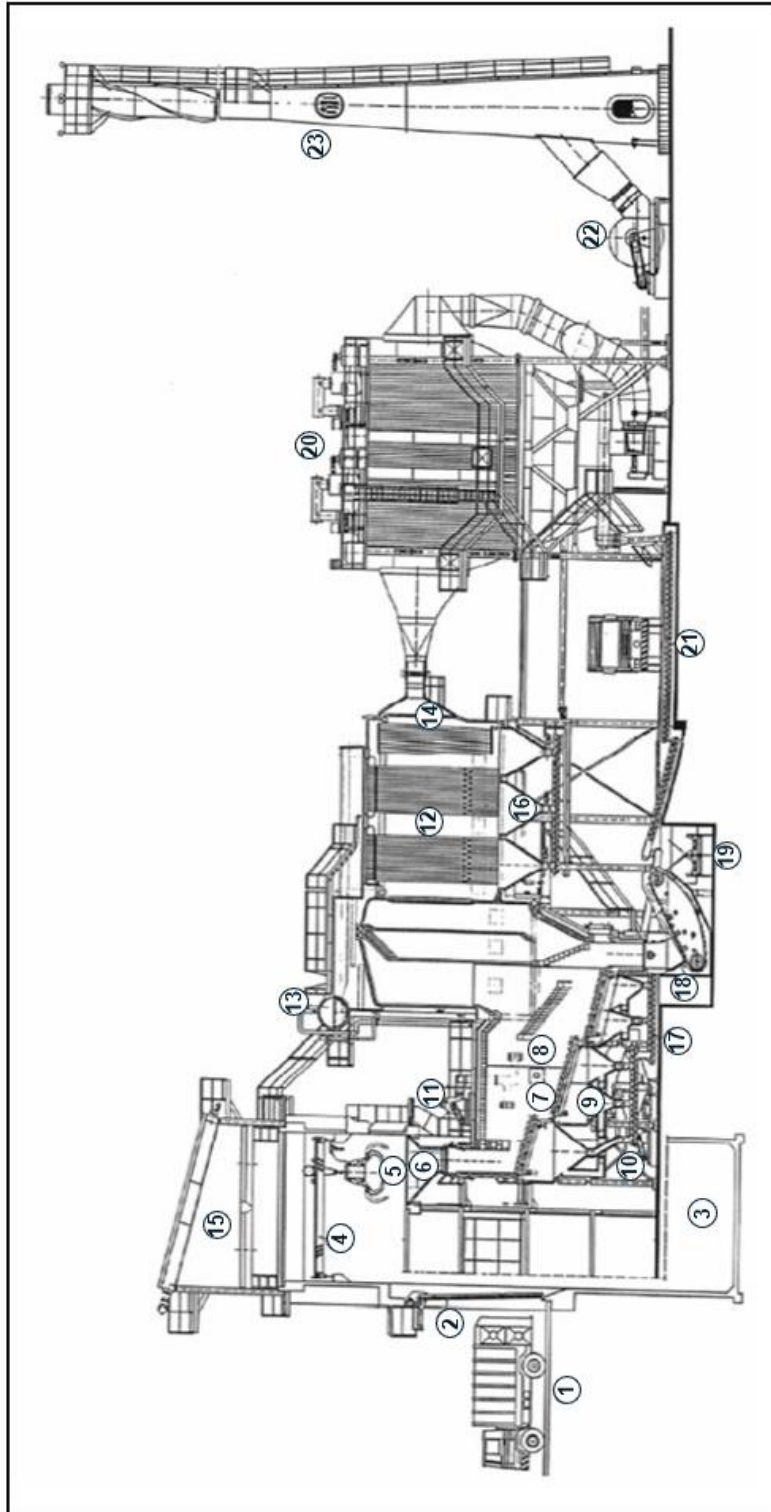
El vapor sobrecalentado, correrá directamente hacia una turbina a la que le provocará un giro de aspas acelerado para activar un generador de energía eléctrica. Posteriormente, el vapor de menor temperatura, dependiendo de la infraestructura de los sistemas de calefacción de la ciudad en que se encuentre, podrá asistir los sistemas urbanos de calefacción o se dirigirá directamente a los aerocondensadores

donde se condensará para regresar a ser utilizada en el mismo proceso de circuito cerrado, sin necesidad de un gasto adicional de agua.

Los gases generados en el horno pasarán por un proceso detallado de remoción de partículas suspendidas, filtrado y depuración de subproductos y compuestos contaminantes, para ser liberados en condiciones prácticamente inertes a la atmósfera. Los subproductos recuperados en este proceso también serán separados y reutilizados en otras industrias o depositados de forma controlada.

Aunque el diseño de proceso puede variar para distintas plantas, debajo se utiliza una referencia de cómo se puede ver la estructura de una planta de termovalorización:

1. Plataforma de descarga
2. Puertas de la fosa
3. Fosa de basura
4. Puente – grúa
5. Garra o cuchara
6. Tolva de alimentación
7. Parrillas quemadoras
8. Cámara de combustión
9. Tolvas de evacuación de cenizas
10. Ventilador primario
11. Ventilador secundario
12. Caldera de recuperación
13. Tambor de vapor
14. Economizador
15. Aerocondensador
16. Tolvas de evacuación de las cenizas
17. Cintas de cenizas del horno
18. Canal de evacuación de escorias
19. Cintas transportadoras de cenizas y escorias
20. Atomizador, precipitadores electrostáticos, absorbedor de gases ácidos, inyección de carbón activado y filtro de mangas
21. Cintas de evacuación de cenizas volátiles
22. Ventilador de tiro
23. Chimenea de evacuación de gases



**Figura 4.** Planta de Termovalorización<sup>42</sup>

<sup>42</sup> Obtenido como referencia de Reciclame España. La numeración puede estar escrita de forma distinta dado a facilidades de comprensión en México y amplitud de la información.

Muchas veces se agrega una etapa de separación de metales de las cenizas recuperadas en el proceso, la cual puede estar dentro de la misma planta o llevarse a cabo en un área distinta de aprovechamiento de las cenizas.

### **III.2 Recolección y consumo de residuos sólidos**

Un proceso efectivo de termovalorización inicia desde la recolección y homogenización de los residuos sólidos. Como es sabido, las propiedades físicas y químicas de muchos de los materiales que terminan en la basura varían de forma importante, dentro de estas, la que más afecta al proceso de termovalorización es la capacidad calorífica de los materiales. Los derivados del petróleo, como el plástico, poseerán una capacidad térmica mucho mayor que la que tienen los restos de comida. Es por esto por lo que es apropiado optimizar adecuadamente para que cada alimentación al horno tenga una capacidad similar de generación de calor al ser incinerada.

En México y alrededor del mundo, aunque existen variaciones importantes por país, la composición de basura es alrededor de 50-60% restos de comida y 50-40% otros productos (plástico, madera, vidrio, etc.)<sup>43</sup>. Si se habla del primer bloque, los restos de comida, se habla de productos de inexistente uso comercial o reciclable, y bajo contenido energético. Es por esto por lo que los procesos de termovalorización pueden ser parcialmente considerados como parte de una economía circular y energías renovables. Al pasar al segundo bloque, otros productos, se habla idealmente de productos con alto contenido energético y que no han sido sujetos a procesos de reutilización o reciclaje, y es por eso por lo que la homogenización de los desperdicios es tan importante. En Estados Unidos, por ejemplo, la biomasa conforma alrededor del 64% del peso los residuos utilizados en plantas de termovalorización, pero conforma apenas el 51% de la electricidad<sup>44</sup>.

El aprovechamiento de plásticos y otros productos no reutilizables o reciclables en este proceso provocará un incremento en la emisión de calor de los residuos

---

<sup>43</sup> Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development; Washington, DC: World Bank. © World Bank.

<sup>44</sup> Administración de Información Energética de Estados Unidos.



incinerados y por lo tanto se vuelve fundamental asegurar que cada alimentación contenga este tipo de productos. Para dar luz al ejemplo y tener claro cuáles son estos residuos no reciclables, que una planta puede obtener sin hacer propensa la no reutilización de productos, aquí se describen algunos materiales de valor comercial nulo y participación importante en una planta de termovalorización: corchos, cepillos de dientes, colillas de cigarro, plásticos de empaque, bolígrafos, productos sanitarios, artículos rotos del hogar, etc. Muchos de estos productos no tienen cabida en varios de los procesos de reciclaje actuales y por lo tanto es importante que se aprovechen en lugar de llevarlos de forma no controlada a un relleno sanitario. A estos desperdicios se sumarán otros residuos comerciales e industriales que aportarán un contenido energético importante al proceso.

Para el método de termovalorización más popular, el de incineración, con detalles que se explicarán más adelante, no será necesaria la discriminación de residuos, únicamente la ya mencionada variabilidad de los mismos. Para esto, dentro de la administración de la planta, deberán existir acuerdos con centros y vehículos de recolección municipales y privados para asegurar la alimentación continua y eficiente de distintos productos, ya que los equipos estarán funcionando sin interrupción durante todo el año.

La basura se recibe en un área de admisión cerrada dentro de la planta, donde se mezcla a fondo en preparación a la combustión. Dentro de la fosa, se propicia un flujo de aire negativo que transporta polvos, gases y olores hacia la cámara de combustión y lejos del área de recepción para evitar su propagación dentro y fuera de las instalaciones<sup>45</sup>. Para el monitoreo de la composición de basura, pueden existir cámaras o ventanas, hacia el depósito de basura asistidos por medidores de temperatura en el horno que indican si la mezcla alimentada está siendo aprovechada por la planta adecuadamente, esto es, si la cantidad de calor generada por los residuos es la esperada para perseguir la producción de energía eléctrica comprometida.

---

<sup>45</sup> Deltaway Energy.

El depósito de basura dentro de cada una de las plantas puede variar en capacidad y por lo tanto en longitud y altura, pero debe tener por lo menos un volumen equivalente a dos días de operación y las dimensiones que permitan que la garra mecánica levante en cada uno de sus movimientos la basura necesaria para mantener el horno activo. Como ejemplo ilustrativo, una garra puede tomar hasta 5,500 metros cúbicos de desperdicio en un solo movimiento, lo equivalente a 5 toneladas de basura siendo movidas hacia las parrillas del incinerador.

Algunas de las condiciones a cuidar dentro del depósito de basura son<sup>46</sup>:

1. Humedad: Esta característica favorece la putrefacción de los productos además de que inhibe el funcionamiento óptimo del horno y rebaja el poder calorífico de los residuos.
2. Mezclado: Además de la manutención de su composición, la mezcla de productos es importante para evitar el rezago de materiales al fondo de la fosa.
3. Material volátil: Debe monitorearse y evitarse la concentración de gases y componentes tóxicos en la fosa, tales como aquellos que contengan nitrógeno o azufre, para aminorar la exposición de los trabajadores previo al proceso de tratamiento de los gases.
4. Cenizas: Una porción elevada de cenizas podría disminuir el poder calorífico del residuo.
5. Composición elemental: Estudiar los residuos existentes en la fosa y la periodicidad con la que se reciben permite pronosticar las emisiones de contaminantes que tendrá el horno y por lo tanto su efectivo tratamiento en el sistema de limpieza de gases.

Estos puntos deberán ser monitoreados de forma constante para asegurar que los residuos involucrados en el proceso de incineración cuenten con las condiciones necesarias para llevar a cabo un inicio de proceso óptimo para el aprovechamiento del calor de los gases y el tratamiento de los mismos.

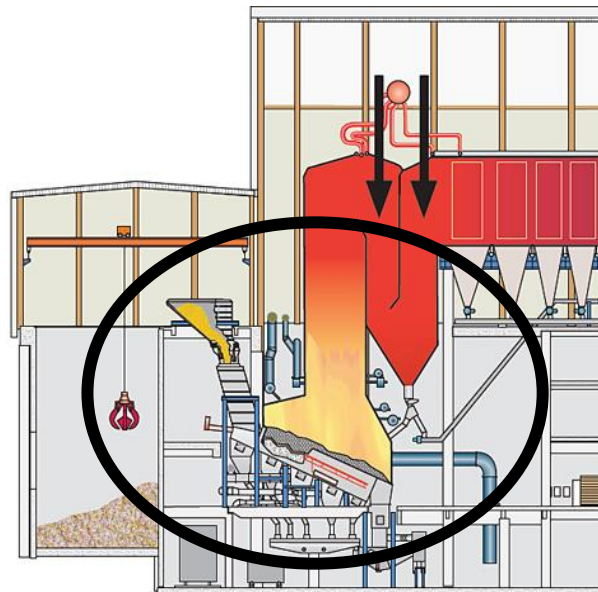
---

<sup>46</sup> Recíclame España.

### III.3 Incineración de residuos sólidos

Dentro de las tecnologías de aprovechamiento de residuos para generar energía, la incineración es la más predominante, principalmente por ser la más probada y para la que existen un mayor número de años de continuas optimizaciones. Algunas otras opciones incluyen el proceso de digestión anaerobia, la gasificación plasma y la pirolisis, que pueden tener desventajas como la necesidad de separación previa de residuos, el costo de la tecnología e incluso la falta de experiencia de la industria con la tecnología.

Dados los evidentes retos que conlleva la minuciosa separación y catálogo de los residuos sólidos en alta escala y el riesgo de llevar a cabo proyectos de efectividad no probada, la incineración ha sido constantemente considerada como la alternativa más conveniente para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos en procesos de termovalorización. Es por esto por lo que los procesos de tratamiento de gases han ido evolucionando a un paso acelerado, liderados por empresas que optan por ser las mejores de su clase en ofrecer servicios eficientes de generación eléctrica.



**Figura 5.** Horno de parrilla<sup>47</sup>

---

<sup>47</sup> Babcock & Wilcox Vølund.

Para el proceso de incineración, la garra y grúa dentro del depósito de basura alimentarán la plancha de incineración de manera constante, con toneladas de residuos sólidos urbanos esperando en el ducto hacia el horno para ser utilizados como materia de combustión en ciclos ininterrumpidos. Estos desechos estarán tan solo un par de segundos sobre la plancha antes de ser completamente incinerados dentro del horno de combustión, mostrado en la Figura 5. Los residuos sólidos urbanos entran a la cámara de combustión hasta llegar a una especie de parrilla móvil cubierta de combustible que genera un movimiento constante para mantener la basura expuesta y en constante incineración, estos movimientos y vibraciones garantizan que el aire pueda llegar a todos los rincones de la basura y ocasionan una combustión efectiva de la misma. Entre los diseños de parrillas más populares, se incluyen aquellos con ligeras inclinaciones para el movimiento de las cenizas hasta su depósito, o diseños irregulares que permiten espacios diseñados entre los movimientos de la parrilla para que las cenizas vayan cayendo constantemente a una zona de recuperación.

Para una combustión efectiva es necesaria la presencia de oxígeno, por lo que integrados dentro del horno existen entradas de aire primario y secundario al proceso, comúnmente inyectadas desde gases extraídos del área de recepción de residuos. El aire primario se introduce desde la parte inferior de las parrillas, muchas veces entre la rejilla de combustión, mientras que el aire secundario es generalmente introducido desde la parte superior del horno. El oxígeno debe estar presente entre los residuos y los gases liberados para asegurar una incineración efectiva, aunque una aireación excesiva puede también disminuir la temperatura del horno y afectar negativamente el proceso. La entrada de aire debe ser constantemente monitoreada a la par de las condiciones de salida del gas y las cenizas.

Dentro del horno de combustión, la temperatura puede llegar hasta los 1,200 °C<sup>48</sup> dependiendo del proceso de la planta. A medida que los desechos experimentan estas temperaturas dentro del horno de combustión, pasan por 3 etapas clave<sup>49</sup>:

---

<sup>48</sup> Universidad Veracruzana.

1. Secado: La humedad de los residuos es eliminada cuando los desechos alcanzan los 100 °C.
2. Volatilización: Entre los 400 y 500 °C, el residuo comienza a sufrir una descomposición térmica importante que genera materia volátil, comenzando desde los 200 °C para los elementos orgánicos dentro del horno de combustión.
3. Combustión: Debido a la composición variable de la materia que entra en el horno, la temperatura y el tiempo necesarios para la combustión de los residuos puede variar. Dentro de los residuos habrá materiales como la comida que ya estarán completamente incinerados desde los 700 °C, otros con una capacidad térmica mayor podrán estar varios minutos expuestos a temperaturas de hasta 1,200 °C hasta lograr una completa incineración.

Dentro de este proceso, 4 toneladas de residuos sólidos urbanos desprenderán la misma energía aprovechable para generación eléctrica que 1 tonelada de petróleo o 2 toneladas de carbón<sup>50</sup>, con efectos de liberación de gas en el ambiente prácticamente nulos después de un tratamiento de gases, a la par de una participación fundamental en el manejo y tratamiento de los residuos sólidos urbanos, problema de vital importancia en el mundo.

Este proceso genera principalmente, como cualquier proceso de combustión, vapor de agua, dióxido de carbono y cenizas (que contendrán, por ejemplo, metales pesados). Los dos últimos, junto con una serie de subproductos nocivos generados en el proceso de combustión, serán posteriormente tratados dentro de las fases más largas e importantes en el proceso de termovalorización, desarrolladas más adelante.

Los subproductos nocivos incluyen tanto partículas finas volátiles como otros gases, entre ellos: óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), ácido clorhídrico (HCl), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), amoníaco (NH<sub>3</sub>), cianuro de hidrógeno (HCN), monóxido de carbono (CO), dioxinas (que en su mayoría se descomponen en la incineración) y

---

<sup>49</sup> Reciclame España.

<sup>50</sup> Babcock & Wilcox Vølund.

otros compuestos que serán tratados en las cámaras de tratamiento de gases de combustión implementadas posteriormente en el proceso, la parte más importante de cada una de las plantas de termovalorización que se adhieren a las mejores prácticas.

Debido a la alta demanda de procesos cada vez más limpios dentro de las plantas de termovalorización, muchos diseños y tecnologías desarrolladas por compañías líderes en el mundo contienen soluciones ya integradas que proveen desde esta etapa de combustión beneficios hacia un proceso ecológico; tales como el B&W Vølund DynaGrate® y Precision Jet® que son diseños de tecnología avanzada que destruyen furanos y dioxinas<sup>50</sup>, y minimizan la formación de NO<sub>x</sub> y CO a la par de mitigar la cantidad de carbón no incinerado. Los incineradores modernos incorporan parrillas y hornos de combustión controlados, diseñados para incinerar los residuos en su totalidad con emisiones cada vez más bajas. Inclusive, en algunos casos, se elimina la necesidad de depuradores de cal y precipitadores electrostáticos en las chimeneas dado que los gases emergentes directamente del horno de combustión son cada vez más limpios.

Durante la combustión, cualquier volumen de residuos alimentado pudiera llegar a reducirse por encima del 95%<sup>51</sup> hasta convertirse en lodos o cenizas que pudieran ser posteriormente aprovechables durante un proceso paralelo de tratamiento. Esta reducción en volumen facilita el manejo y depósito de las cenizas como subproducto, donde, al homogeneizar sus características fisicoquímicas, componentes como metales pueden ser extraídos de las cenizas para su uso en otras industrias. Este proceso paralelo de aprovechamiento de cenizas será explicado a detalle más adelante.

Las plantas de termovalorización de residuos sólidos que utilizan la incineración como método de energización de la basura son las más comunes en el mundo, principalmente por la conveniencia que existe en no tener que separar los residuos y la solidez que otorgan años de refinamiento del proceso de tratamiento de gases post-incineración. Dada la natural inconsistencia de la basura, un papel muy

---

<sup>51</sup> Agencia de Protección del Medio Ambiente (EUA).

importante en la eficiencia de la incineración lo juegan el diseño y movimientos de la parrilla, que, asistidas por una eficiente entrada de aire, garantizan la combustión de todos los desechos que entran al horno.

#### **III.4 Tratamiento y salida de gases**

Como se mencionó en la sección anterior, los gases de salida del horno pueden contener partículas altamente nocivas que no deben ser liberadas al ambiente por su alta capacidad de degradación del medio ambiente y la salud de los seres vivos. Durante los últimos años, regulaciones estrictas y movimientos de activación ambiental han ejercido presión en plantas de incineración para asegurar optimizaciones robustas en sus procesos de tratamiento de gases y garantizar emisiones de contribución mínima al ambiente. Las nuevas plantas y mejores prácticas, tanto como respuesta a esta presión social como en búsqueda de añadir fuerza a su propuesta de valor, año con año han hecho esfuerzos distintivos para eficientizar el tratamiento de estos gases antes de liberarlos a la atmósfera. Tanto así, que a pesar de que las más exigentes regulaciones ambientales gubernamentales han entrado en vigor para países europeos y para los Estados Unidos, las nuevas plantas de termovalorización llegan a ser decenas de veces más eficientes que la factura mínima de emisiones requerida, con liberaciones de aire inofensivas desde que salen de la planta. Esto genera un círculo virtuoso de buenas prácticas en el que las plantas más comprometidas con el medio ambiente siguen haciéndose más eficientes ocasionándoles la obtención de mayor participación en licitaciones de gobierno y mayor penetración de mercado.

El proceso de tratamiento de gases de combustión es, por mucho, el más importante dentro de la planta de termovalorización. El proceso de captura y purificación del gas de combustión que sale del horno se lleva a cabo en varias fases e involucra de forma paralela el aprovechamiento de la temperatura de los gases para la transferencia de energía que ocasiona la vaporización del agua y, por ende, el funcionamiento de las turbinas de generación eléctrica. Dependiendo de la composición de basura, el nivel de cada uno de los gases y las partículas nocivas podrá variar en el momento de la combustión. Un tratamiento previo de la basura en la planta asiste en la homogenización del gas de combustión que

asistido por los sistemas de regulación de partículas nocivas dentro de la planta asegurarán que cada uno de estos compuestos sea captado o neutralizado en alguna o varias fases del sistema de control de emisiones.

El proceso de ignición creará dos tipos de residuos de ceniza dentro del sistema. La ceniza de fondo se recopilará en la parte baja del horno, que dependiendo de la eficiencia en la combustión podrá representar entre el 5-15% del volumen total puesto en combustión<sup>52</sup>. La ceniza volante, en cambio, se recuperará posteriormente en el tratado de los gases, a través de sistemas ciclónicos, filtros de mangas o separadores electrostáticos (según sea el caso para cada planta) y representará menos del 5% de los residuos que entran a la planta. Ambos tipos de cenizas deben recibir un tratado posterior a su captura y según su proceso de separación (visto más adelante) podrán tener un uso en otras industrias. En plantas que se adhieren a las mejores prácticas de recuperación de subproductos, solo alrededor del 1% de todo lo que entra al horno no puede ser aprovechado y debe eliminarse como residuo peligroso de forma segura. Las aguas residuales producidas por la planta son tratadas y luego liberadas en condiciones absolutamente inertes al medio ambiente, con estándares de calidad en países europeos que muchas veces superan los del agua potable.

Los gases comúnmente más emitidos por la incineración de basura son: óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de sulfuro (SO<sub>2</sub>), dióxido y monóxido de carbono (COx), metales pesados, dioxinas, furanos, gases ácidos (que contengan F o Cl), etc. Para cada uno de estos componentes existirá un sistema que erradique su aparición en la salida de la planta, o por lo menos lo lleve a niveles de concentración prácticamente inofensivos a través de sistemas de filtros, adsorción fregado y/u otros equipos. Es durante la etapa de tratamiento de gases donde plantas de termovalorización de primer nivel realmente se distinguen y destacan sobre las tecnologías tradicionales.

Las emisiones en plantas de termovalorización se han reducido significativamente en los últimos 25 años. Entre 1990 y 2000, las emisiones de dioxinas de las

---

<sup>52</sup> Agencia de Protección del Medio Ambiente (EUA).



plantas de “energía a base de residuos” en Alemania bajaron de 400 g a menos de 0.5 g por año, mientras que la cantidad de residuos tratados en procesos de termovalorización aumentó más del doble durante el mismo período.<sup>53</sup> Las plantas europeas lideran con el nivel más bajo de emisiones de todos los sectores industriales<sup>54</sup>. Como se mencionó anteriormente, muchas veces con emisiones más saludables para respirar que el aire en muchas ciudades del mundo. Según el New York Times, las plantas de incineración modernas son tan limpias que "muchas veces se libera más dioxina de las chimeneas y las barbacoas de los patios que de las plantas de termovalorización"<sup>55</sup>.

El ensamblaje de sistemas de tratamiento y flujo de gases para cada planta de termovalorización puede variar según sus prácticas y necesidades. La calidad y condiciones de los residuos generados a través del mundo pueden ser distintas, y con esto, las integraciones que tengan los equipos dentro de la planta. A pesar de esto, existen sistemas clave en el tratamiento de gases que a pesar de diferencias en sus integraciones con otros sistemas (por ejemplo, absorbentes en la inyección del filtro de mangas) suelen ser parte del proceso de limpieza de los gases de combustión, que tiene como objetivo limpiar la salida de gases y recuperar materiales para apoyar una economía circular.

### **Soluciones dentro del horno de parrilla**

La reducción de gases emitidos a la atmósfera comienza desde su etapa de aparición. En el horno de parrilla, los residuos sólidos son llevados a combustión a temperaturas de hasta 1,200 °C donde se ocasiona un proceso de combustión homogéneo a través de la continua mezcla de los residuos en la parrilla. Para asegurar también la combustión absoluta de partículas volantes, el aire primario hace entrada entre las barras de la parrilla, creando una zona de combustión fuerte y turbulenta, donde el nivel de oxígeno inyectado al sistema es controlado para mantener temperaturas homogéneas en el horno, mitigar la corrosión de las paredes, reducir la formación de óxidos de nitrógeno, fomentar la eliminación de

---

<sup>53</sup> Confederación Europea de Plantas de Termovalorización.

<sup>54</sup> Babcock & Wilcox Vølund.

<sup>55</sup> The New York Times.

dioxinas/furanos y aumentar la eficiencia térmica evitando el exceso de aire y la recirculación de los gases de combustión.

Las dioxinas y furanos, compuestos dañinos formados durante el proceso de combustión, son producto de una combustión incompleta y pueden ser eliminados en gran parte desde el horno de combustión. Mantener a estos compuestos alejados de los gases de salida se puede simplemente conseguir a través de condiciones de operación adecuadas. Una temperatura constante, por encima de 900°C, con niveles adecuados de oxígeno (controlados para evitar la sobre formación de óxidos de nitrógeno) puede destruir hasta el 99% de estos componentes<sup>56</sup> en tan solo unos segundos dentro del horno de combustión, con equipos de posterior de asistencia que eliminan su liberación casi totalmente.

La formación de óxidos de nitrógeno también puede ser neutralizada desde el horno de parrilla. Esto se logra a través de la inyección controlada de amoníaco y/o urea sobre los gases de combustión para convertir los óxidos de nitrógeno en nitrógeno inerte. En este proceso, un atomizador dispara la mezcla de agua y aire desde la pared trasera y baja del horno hacia los gases de combustión. Al entrar en contacto con los gases, los componentes reductores, como el amoníaco y el monóxido de carbono, reaccionan con los óxidos de nitrógeno en la parte posterior del horno para formar nitrógeno. Este método también asiste en reducir los picos de temperatura en el horno y por consecuencia mejorar las condiciones de combustión de las cenizas de fondo. Este método de reducción de gases NO<sub>x</sub> puede ser asistido por otros procesos de reducción de nitrógeno para asegurar una limpieza eficiente del gas de salida.

A partir de este punto, en la salida del horno, la temperatura de los gases de combustión comienza a disminuir al ser expuestos a un proceso de intercambio de calor que proporciona la generación de electricidad y calefacción urbana comprometida por la planta de termovalorización, proceso paralelo detallado más adelante. Con una temperatura en los gases de combustión de alrededor de

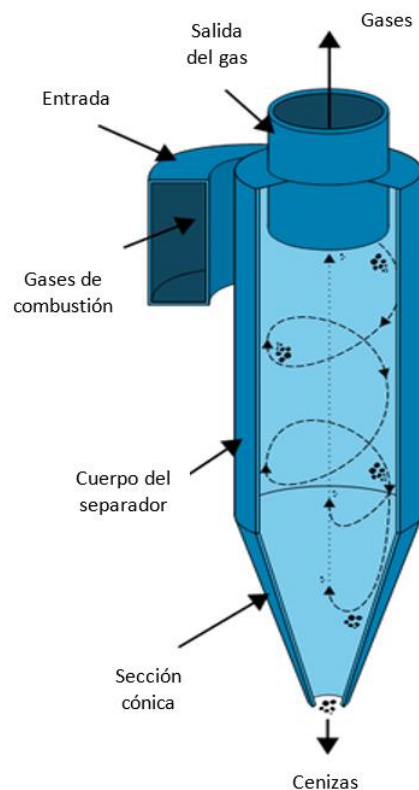
---

<sup>56</sup> Deltaway Energy.

350°C, los mismos entran dentro de un proceso detallado de depuración de partículas y gases previo a su salida de la planta.

### Separador ciclónico

Aunque el separador ciclónico no es el equipo principal para la remoción de partículas suspendidas en los gases de combustión, este puede llegar a ser un importante complemento previo al equipo de filtros de manga o precipitadores electrostáticos empleados en el sistema de limpieza de gases. Los separadores ciclónicos pueden ser muy eficientes removiendo partículas de un diámetro mayor a los 10 micrómetros, que en nuevos y más eficientes hornos de parrilla pueden no ser tan comunes y, por ende, vuelven este equipo más complementario que necesario en algunos procesos de tratamiento, aligerando la carga de polvo para sistemas posteriores. Para la reducción de partículas menores a 10 micrómetros se incluyen posteriormente precipitadores electrostáticos y filtros de mangas.



**Figura 6.** Separador ciclónico<sup>57</sup>

<sup>57</sup> Energy Education (traducido para mejor entendimiento).

El separador ciclónico, como se muestra en la Figura 6, es un sistema recolector de partículas que utiliza un movimiento centrífugo para separar el polvo de una corriente de gas sin el uso de un filtro de aire. Este aprovecha la formación de un vórtice y los efectos de gravedad para ocasionar la separación de partículas suspendidas en el gas. El aire entra al ciclón por la parte superior del embudo y al chocar en las paredes ocasiona que las partículas pesadas dentro del ciclón se arrojen hacia los extremos y caigan por su propio peso hacia la parte baja en el recipiente al fondo del ciclón. La forma del equipo, más angosta cuanto más baja, y la velocidad del gas, crean un vórtice que ocasiona que el gas y las partículas menos pesadas salgan por la parte superior del ciclón. La velocidad de rotación del gas determina la efectividad de la separación: cuanto más rápida sea la rotación, más eficiente la separación, aunque el sistema generalmente cuenta con una eficiencia de separación del 60-80% para partículas por encima de los 10 micrómetros.

Los separadores ciclónicos no requieren de constante mantenimiento y cuentan con una operación continua y confiable, lo que los hace excelentes precursores para los procesos de limpieza de gases.

### **Precipitadores electrostáticos**

Posterior al separador ciclónico pueden encontrarse tanto un equipo de filtro de mangas como un sistema de precipitadores electrostáticos, ambos equipos diseñados para remover las partículas más pequeñas suspendidas en los gases para su posterior procesamiento. Ambos equipos también, capaces de incluir dentro de su sistema distintas adecuaciones para asistir el tratamiento de gases ácidos y otros componentes descritos más adelante.

Dentro de los precipitadores electrostáticos, las impurezas dentro de la corriente de gas se cargan con iones negativos por efecto de una inducción de carga electrostática y son atraídas por láminas de electrodos colectores con carga opuesta, generalmente con un voltaje aplicado de entre 20 y 100 kV<sup>58</sup>. El flujo de gases no se ve afectado dentro del sistema ya que la carga afecta únicamente a

---

<sup>58</sup> EEW - Energy from Waste Germany.

las impurezas, que pueden ser desde partículas sólidas hasta gotas de líquido dentro del gas de combustión. Las láminas que atraen las impurezas son constantemente limpiadas mediante vibraciones que ocasionan que las partículas captadas se desprendan y caigan al fondo del equipo para su recolección. Dependiendo de factores tales como el tamaño de las partículas y el diseño del precipitador electrostático, este tratamiento puede eliminar más del 99% de las partículas dentro del gas<sup>59</sup>.

Los precipitadores electrostáticos son dispositivos de bajo mantenimiento, bajos costos de operación y alta confiabilidad ya que mantienen su alta eficiencia incluso en condiciones de altas concentraciones de partículas.

Aunque la precipitación electrostática dentro de un proceso de termovalorización es generalmente un proceso en seco, se ha incursionado en recurrir a precipitadores húmedos para asistir en la eficiencia de los sistemas de tratamiento de gases, ya que el proceso húmedo asiste en recolectar partículas excepcionalmente finas en el proceso de limpieza. Un precipitador electrostático húmedo funciona con corrientes de aire saturadas de vapor de agua (100% de humedad relativa) y se usan comúnmente para eliminar gotas de líquido, como la niebla de ácido sulfúrico de las corrientes de gas, inyectar solventes para remover otros componentes, o cuando los gases tienen un alto contenido de humedad, contienen partículas combustibles o partículas de naturaleza pegajosa. Babcock & Wilcox Vølund, una empresa líder en procesos de termovalorización ha incursionado ya en la precipitación electrostática húmeda como filtro final, ayudándole a contar con las emisiones globales más bajas de partículas finas (<0.3 mg/Nm<sup>3</sup>, decenas de veces más bajo que la norma europea) y neblina ácida.

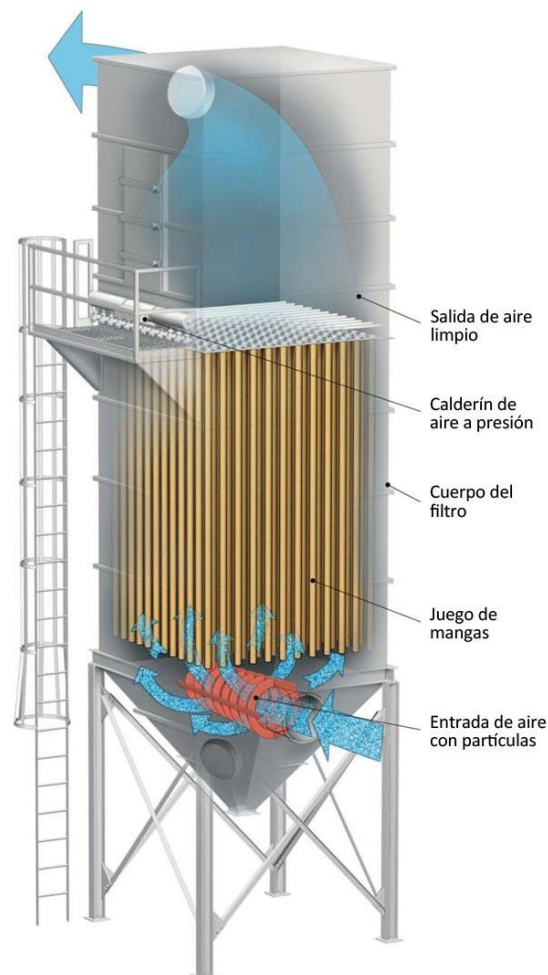
### **Filtro de mangas**

Generalmente como solución alternativa a los precipitadores electrostáticos, dependiendo de las características y las necesidades de la planta, los gases de combustión se dirigen hacia al filtro de mangas. Este equipo tiene como función principal, al igual que los precipitadores, el remover las partículas más pequeñas

---

<sup>59</sup> Enciclopedia Británica.

suspendidas dentro de los gases. Además, y dada la capacidad de adecuación de un equipo de filtro de mangas, en este sistema se buscará también remover componentes indeseables como mercurio y dioxinas, a través de la inyección en seco de carbón activado y la mitigación de los gases ácidos a través de la presencia de carbonato de calcio, carbonato de sodio o cal en el cuerpo de los filtros de mangas.



**Figura 7.** Filtro de mangas<sup>60</sup>

El proceso por el que pasan los gases de combustión en el filtro de mangas, ejemplificado en la figura 7, es simple. El equipo da entrada a los gases por la parte baja del sistema, donde los gases suben hasta encontrarse con un conjunto de bolsas alargadas permeables a través de las cuales fluye el gas. Dentro de ellas, las partículas presentes en los gases son retenidas por los tejidos para dar

<sup>60</sup> Gamoher Environmental.

paso únicamente a los gases puros. En la parte superior de las bolsas, las cuales remueven por encima del 99% de las partículas presentes en el gas, se encuentran inyectores que trabajan con la doble función de expulsar aire dentro de las bolsas para impulsar a las partículas atrapadas hacia el fondo del equipo, mientras inyectan componentes como carbonato de sodio y carbón activado para el tratamiento paralelo de los gases. El primero para neutralizar la presencia de componentes ácidos como HCl, HF y remover SO<sub>2</sub> con hasta 80% de eficiencia<sup>61</sup>, y el segundo para absorber dioxinas, mercurio y cadmio dentro de los gases para llevarlos al fondo de recolección en el equipo para ser tratados como desechos peligrosos. De esta forma, no solo se eliminan los polvos finos de los gases de combustión, sino también se reducen los componentes ácidos dentro de los gases.

Las reacciones de neutralización ocurridas dentro del filtro de mangas, de usar carbonato de sodio como reactivo, son:

- $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{CO}_2$  (A)
- $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CO}_2$  (B)
- $\text{Na}_2\text{CO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow 2\text{NaCl} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  (C)
- $\text{Na}_2\text{CO}_3 + 2\text{HF} \rightarrow 2\text{NaF} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  (D)

La remoción de mercurio dentro del sistema de tratamiento de gases es compleja y requiere de la complementación de sistemas para asegurar niveles muy por debajo de los establecidos en las normas de emisión. El mercurio es una neurotoxina liberada tanto en su forma elemental como oxidada dentro de las plantas de termovalorización, el proceso de fijación de mercurio en el filtro de mangas tiene como objetivo fijar el mercurio elemental en carbón activado (impregnado con yodo o cloro para aumentar su efectividad) ya que el mercurio elemental no es soluble y por lo tanto requiere de un oxidante para ser removido en el depurador, donde su presentación oxidada podrá removerse al ser soluble en agua. Un proceso eficiente de remoción de mercurio dentro del filtro de mangas

---

<sup>61</sup> Babcock & Wilcox Vølund.

puede llegar a remover hasta el 60% del mercurio elemental<sup>62</sup> y un porcentaje menor del mercurio oxidado, siendo asistido posteriormente por el depurador o un sistema de inyección de carbón activado dirigido directamente al flujo de gases.

### **Reactores Catalíticos**

Dentro del horno de parrilla, el nitrógeno involucrado en la combustión se oxida para formar óxidos de nitrógeno en las reacciones:  $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$  y  $2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$ . Tanto el NO como el NO<sub>2</sub> son componentes tóxicos que deben ser removidos de las plantas de termovalorización, ya que contribuyen a la formación de lluvia ácida y la oxidación en la atmósfera. Ya que desde su formación en el horno de parrilla se presenta una solución para su mitigación, el reactor catalítico es una segunda fase de eliminación de los óxidos de nitrógeno en la que existen dos opciones de remoción<sup>63 64</sup>:

- Reducción catalítica selectiva: Desnitrificación de los gases utilizando amoníaco como reactivo para formar nitrógeno y agua mediante la siguiente reacción:  $4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$  (90% de eficiencia).
- Reducción no-catalítica selectiva: Desnitrificación de los gases utilizando urea como reactivo para formar nitrógeno, dióxido de carbono y agua mediante las reacciones:  $CH_4N_2O + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2$  y  $4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 6H_2O + 4N_2$  (70% de eficiencia) Este proceso no requiere de un catalizador y se utiliza como alternativa de bajo costo.

Si se toman las mejores prácticas de reducción de óxidos de nitrógeno en el mercado, hay un enfoque entonces en la reducción catalítica selectiva de los óxidos de nitrógeno. Esta reacción es asistida por un catalizador, comúnmente vanadio o titanio, que permite, además de la ejecución de la reacción, una ventana de temperatura más amplia para la realización de esta.

---

<sup>62</sup> Enciclopedia Británica.

<sup>63</sup> EEW - Energy from Waste Germany.

<sup>64</sup> Science Direct.



Para esta reacción, el gas de combustión fluye a través de una torre de reactor que contiene varios niveles de catalizadores del tipo placa o panel, instalados en la torre del reactor de forma modular, con solución de amoníaco alimentada a través de boquillas. En el reactor, se rocían los gases de combustión con amoníaco, asegurando una mezcla efectiva en todo el rango de carga, para disminuir el desperdicio del reactivo y asegurar requisitos mínimos de mantenimiento. La temperatura de reacción ideal oscila entre los 300 y 400 °C.

Si la eliminación de compuestos nocivos de nitrógeno se lleva a cabo como primer paso en el proceso de tratamiento de los gases de combustión, se recomienda utilizar catalizadores tipo placa, ya que los gases de combustión aún podrían contener partículas de polvo. Si, como es el caso presentado ahora, los gases de combustión ya fueron tratados en un proceso de eliminación de partículas, la construcción del catalizador en tipo panel es la más recomendable.

Esta alternativa de eliminación de óxidos de nitrógeno, a pesar de contar con muchas ventajas, debe ser materia de cuidado dentro de la planta de termovalorización, ya que requiere de altos niveles de mantenimiento, monitoreo y manejo del amoníaco no reaccionado y conversión de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  por la presencia de los catalizadores.

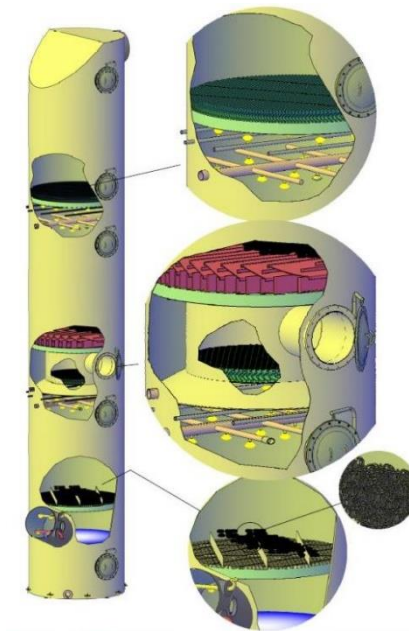
### **Depurador**

Las reacciones de neutralización de un ácido o una base ocurren de forma espontánea al ser puestos en contacto para liberar sales y agua. Esta reacción es la que apalancan los procesos de inyección de bases dentro del filtro de mangas. La misma reacción, en dirección opuesta, ocurre dentro del horno de parrilla al inicio de la combustión. Es decir, las sales, al recibir una cantidad alta de energía en presencia de humedad, forman ácidos de S, F y Cl que se oxidan y terminan dentro de la corriente de gas; formando bases que en cambio terminan dentro de las cenizas de fondo.

Los depuradores actúan como uno de los principales removedores de estos gases ácidos en la corriente del gas de combustión, a la par de poder ser utilizados como sistemas de recuperación de calor por condensación de los gases de combustión.

Ya sea como depuradores en seco o húmedos, los más comunes y descritos en esta sección, el objetivo principal de estos equipos es la eliminación de la acidez encontrada dentro de los gases de combustión. Entender que la inyección previa de sustancias alcalinas y/o adsorbentes asiste en este proceso, así como conocer la interrelación entre varias tecnologías para aprovechar sus beneficios reduce significativamente los costos de producción durante toda la vida útil de la planta.

Debido a que los gases de incineración pueden ser extremadamente corrosivos, algunos diseños de los equipos pueden componerse mayormente con plásticos reforzados de vidrio<sup>65</sup>. En un depurador multietapa, como se muestra en la Figura 8, los gases ingresan desde la parte baja del equipo para encontrarse primero con una sección de polipropileno dopado de carbón activado, un material de absorción de dioxinas, cadmio y mercurio que aprovecha la eficaz absorción del polipropileno y la capacidad de retención del carbón activado. Este material se sostiene en una rejilla de plástico reforzado que evita la corrosión y permite el flujo posterior de los gases.



**Figura 8.** Depurador de tres niveles<sup>65</sup>

---

<sup>65</sup> Babcock & Wilcox Vølund.

En la parte central del depurador se encuentra un tubo de circulación que se abre en distintas ramas para rociar el gas de hidróxido de calcio o sosa, que neutralizan los gases ácidos para formar sales sólidas o yeso posteriormente removidos. También en la parte central se encuentran placas de separación que captan y remueven la fase líquida formada por las reacciones de neutralización de los gases y el rocío de cal hidratada, estos también funcionan como deflectores del flujo de vapor, aumentando la efectividad en el rocío de la cal nebulizada. En el sector superior se encuentra otra fase de rocío de alcalinos para asegurar la salida de gases inertes. El sistema cuenta con un tanque de circulación integrado que minimiza el consumo de energía en el sistema de la bomba.

Dentro de este proceso, una gran porción de metales pesados también es removida al condensarse en la superficie de las placas intermedias, ya que el procesamiento dentro de los depuradores puede darse a temperaturas más bajas, muchas veces hasta menores a la temperatura de ebullición del agua, con el objetivo de hacer más eficiente la condensación de los metales pesados vaporosos. Estas temperaturas pueden obtenerse a través de un sistema de intercambiadores de calor que aprovecha el calor de los gases para asistir en el proceso de generación de energía de la planta, proceso descrito más adelante.

Algunos de los componentes removidos del flujo de gases dentro del equipo son:

- HCl: Eliminado hasta en un 94%<sup>66</sup>, el ácido clorhídrico es un ácido poderoso extremadamente soluble en agua. Es suficiente con rociar de agua el gas de combustión para que este se disuelva en él, esto es altamente aprovechable en los sistemas de depuración húmeda. Dentro de los depuradores, y dependiendo del sistema utilizado en cada uno, puede haber dos etapas de limpieza: La primera en condiciones ácidas (pH alrededor de 1 para la remoción de ácido clorhídrico, fluoruro de hidrógeno metales pesados) y otra en condiciones neutras para la eliminación del dióxido de azufre.
- SO<sub>2</sub>: Eliminado en mejores prácticas hasta con un 99% de efectividad<sup>66</sup>, el dióxido de azufre forma un ácido débil que a diferencia del HCl no requiere de

---

<sup>66</sup> Babcock & Wilcox Vølund.

únicamente agua para removerse si no de una base complementaria que le permite disolverse. Este producto es generalmente cal hidratada que reacciona para formar yeso como subproducto, material comercializable y de bajo impacto ambiental.

- Mercurio: El proceso de depuración húmeda asiste al proceso de fijación de mercurio en carbono activado dentro del filtro de mangas. El mercurio oxidado soluble en agua es removido a través de la nebulización dentro del depurador, mientras que el mercurio elemental no soluble, es oxidado con agentes ecológicos para solubilizarse, o bien, captado en la primera fase de tratamiento a través de la fijación en polipropileno dopado de carbón activado. Esta complementación de procesos de remoción de mercurio con el filtro de mangas es altamente efectiva para picos de concentración.
- CO<sub>2</sub>: Los depuradores secuestran dióxido de carbono en el gas de forma inherente. El rocío de las bases ocasiona una reacción con el CO<sub>2</sub> para formar precipitados de carbonato y agua, estos subproductos son posteriormente removidos del equipo y tratados en lugares de almacenamiento seguro.
- Cadmio y dioxinas adsorbidos a lo largo de las rejillas de polipropileno y carbón activado colocadas en el depurador.

El agua de descarga ácida que sale de este proceso contiene mercurio posteriormente removido en la sección de tratamiento de residuos. El agua ácida puede ser neutralizada con las bases contenidas en las cenizas de fondo, o bien tratada en su neutralización de otras formas. El yeso puede ser objeto de comercialización.

### **Tratamiento de aguas residuales**

El agua residual dentro de las plantas de termovalorización puede ser tratada, manejada, depositada o recirculada de varias formas según las regulaciones y sistemas de optimización a los que esté sujeta cada planta. En la medida de lo posible, la recirculación de agua deber ser siempre la prioridad de los sistemas de procesamiento, pero cuando esto no es posible, la salida de agua más importante

será la recibida por el fondo de los depuradores en el proceso de limpieza de gases. Esta agua, de no poder ser recirculada dentro del mismo equipo, puede ser utilizada en otros procesos dentro de la planta como el de agua de alimentación en la caldera o fuera de la planta asistiendo al sistema de calefacción urbana si la infraestructura municipal lo permite.

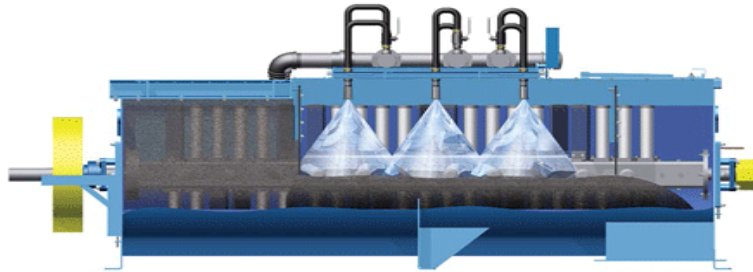
Los principales tipos de tratamiento de agua son:

- **Floculación:** Este proceso químico requiere el uso de floculantes que se adhieren a las partículas en el agua para formar aglutinados de mayor volumen que posteriormente pueden ser filtrados o decantados. Este proceso puede asistirse de la adición de otros reactivos como el hidróxido de calcio para formar yeso posteriormente filtrable.
- **Intercambio de iones, ablandadores o descalcificadores:** Por definición, el agua residual de los procesos de neutralización ocurridos en el depurador contendrá sales. Ya sea como bicarbonatos, sulfatos, etc. que pueden ocasionar incrustaciones en tuberías o depósitos de agua. Un proceso de intercambio de iones en resinas o polímeros puede ser una opción para remover estas sales (iones en agua), aunque comúnmente se utilizan instalaciones de nanofiltración u osmosis inversa.

Otra alternativa de uso del agua ácida en la salida de los depuradores es su utilización para tratar las cenizas de fondo o cenizas volátiles atrapadas en los precipitadores electrostáticos o el filtro de mangas, muchas veces ricas en calcio. Este proceso se lleva a cabo en un equipo de lavado de cenizas, como se muestra en la Figura 9. Las cenizas entran en un equipo sellado a través del cual avanzan impulsadas por placas que favorecen su mezclado mientras son rociadas por el agua ácida que sale de los depuradores. El volumen de agua se controla mediante una válvula reguladora y se monitorea a través de un medidor de flujo. Al final del equipo, el nivel de basicidad de las cenizas es reducido a niveles que permiten su posterior depósito o reutilización en otras industrias.

Esta solución minimiza el uso del agua de proceso de la planta para la limpieza y humidificación de las cenizas, acondicionándolas y estabilizándolas para su

transporte hacia depósitos hermetizados o posterior reutilización, evitando la propagación de polvos dañinos, a la par de ofrecer una alternativa económica para reciclar las aguas residuales del depurador.



**Figura 9.** Lavado de cenizas<sup>67</sup>

### **III.5 Recolección y manejo de lodos y cenizas**

El proceso de termovalorización tiene como subproductos dos tipos de ceniza que se dan en distintos puntos del flujo de proceso: la ceniza de fondos, compuesta por material incombustible, y la ceniza volante, que se recupera en los filtros de manga, precipitadores electrostáticos y hasta en los depuradores. La ceniza recuperada de los depuradores es la más escasa y no compone un porcentaje relevante respecto a las dos anteriores. En procesos de termovalorización de primer nivel las cenizas en general formarán entre el 5-15% del volumen inicial de los residuos en el horno, con aproximadamente el 10-15% de estos siendo cenizas volantes y el restante 90-85% cenizas de fondo, por lo que las cenizas volantes pueden llegar a constituir el 1% del volumen inicial procesado.

Dentro de las cenizas de fondo se encuentran minerales y metales aprovechables con un nivel de toxicidad mucho menor que las cenizas volantes ya que su exposición a partículas tóxicas formadas por la combustión es más reducida. La composición de las cenizas de fondo puede variar, pero son generalmente 80-85% minerales y 15-20% metales férricos y no férricos<sup>68</sup>, con los primeros siendo alrededor del 80% de la mezcla. Dentro de las mejores prácticas, se puede

---

<sup>67</sup> Babcock & Wilcox Vølund.

<sup>68</sup> Confederación Europea de Plantas de Termovalorización.

esperar recuperar hasta 85% del material férrico y 60% del no férrico<sup>69</sup>, porcentajes que hacen el proceso de aprovechamiento muy completo. Los principales componentes de las cenizas de fondo son sílice (arena o cuarzo) y óxidos de calcio, hierro y aluminio. Dado que su composición dentro de la variación de los procesos es relativamente estable y sus condiciones no son altamente tóxicas, las cenizas de fondo son comúnmente recicladas en las plantas de termovalorización. Las cenizas volantes, por otro parte, contienen una concentración mucho mayor de materiales tóxicos y su proceso de mantenimiento es más especializado. Comúnmente estas cenizas son tratadas en procesos de lavado y tratamiento, como el descrito anteriormente, para ser aprovechadas porcentualmente en la industria de la construcción como relleno o asfalto, como adsorbentes o como materiales alcalinos para transformar lodos de aguas residuales en fertilizantes orgánicos.

El impacto que tiene el reciclaje de estos materiales es de vital importancia tanto ambiental como económica para estas plantas. La Confederación Europea de Plantas de Termovalorización argumenta que en 2017 fueron procesadas alrededor de 100 millones de toneladas de basura, generando 19 millones de toneladas totales de cenizas de fondo y 2.3 millones de toneladas de metales férricos, lo equivalente a 10 veces el peso del crucero más grande del mundo<sup>70</sup>, mitigando las emisiones de hasta 4 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por cuenta de 2,000 kg de CO<sub>2</sub> equivalente reducidos por cada tonelada de metal ferroso reciclado<sup>71</sup>. La empresa Covanta Energy, por su parte, cuenta con relaciones similares, con 20 millones de toneladas de residuos procesados y 400,000 toneladas de metales férricos aprovechadas, lo equivalente al acero necesario para construir 5 veces el Golden Gate, esto sin contar la recuperación de aluminio que tuvieron, argumentando que fue lo equivalente al necesario para producir mil

---

<sup>69</sup> Waste Management World.

<sup>70</sup> "Harmony of the Seas" Royal Caribbean International.

<sup>71</sup> Confederación Europea de Plantas de Termovalorización.

millones de latas de refresco. La relación de metales férricos a aluminio es de 1.2-2.5 kg de aluminio por cada 15-20 kg de metales férricos recuperados<sup>72</sup>.

Estos metales pueden ser separados de la composición inicial de cenizas de fondo al someterse a procesos de homogenización y recuperación por magnetismo y separadores de corriente de Foucault<sup>73</sup> para recuperar tanto materiales ferrosos como otros metales, como latón, níquel, cobre y aluminio para su reciclaje. Esto ocasiona una reducción importante en procesos de explotación para la obtención de metales y por lo tanto la mitigación del CO<sub>2</sub> que hubiese sido generado en esos procesos.

Los sistemas de recuperación de metales convencionales a menudo se limitan al procesamiento de materiales de alimentación y fragmentos grandes (más de 12 milímetros)<sup>74</sup> en la ceniza de fondo. Sin embargo, los nuevos sistemas que introducidos en Europa han comenzado a apuntar a los fragmentos más pequeños con mayor énfasis en las cenizas de fondo. Países como Alemania y los Países Bajos llegan a reutilizar hasta el 70% y 90% respectivamente con otros como Estados Unidos apenas llegando al 5%<sup>75</sup>. Esto deja un importante camino de oportunidad para hacer aparecer estos productos como una solución adicional para distintas industrias.

Hoy en día, y según los datos mostrados, del 100% del material introducido a una planta de termovalorización, solo alrededor del 1% no puede ser reutilizado. Ya es posible reutilizar más del 90% de las cenizas de fondo, mitigando el impacto ambiental de millones de toneladas de CO<sub>2</sub> liberadas al ambiente y reduciendo la explotación ambiental por consecuencia de procesos de obtención de millones de toneladas de metales y minerales para un sinfín de industrias. Esto, complementando a un tratamiento, reutilización y depósito responsable de cenizas volantes, provoca un proceso altamente eficiente de manejo de basura, generación de energía y reciclaje de materiales.

---

<sup>72</sup> Universidad Técnica de Dinamarca.

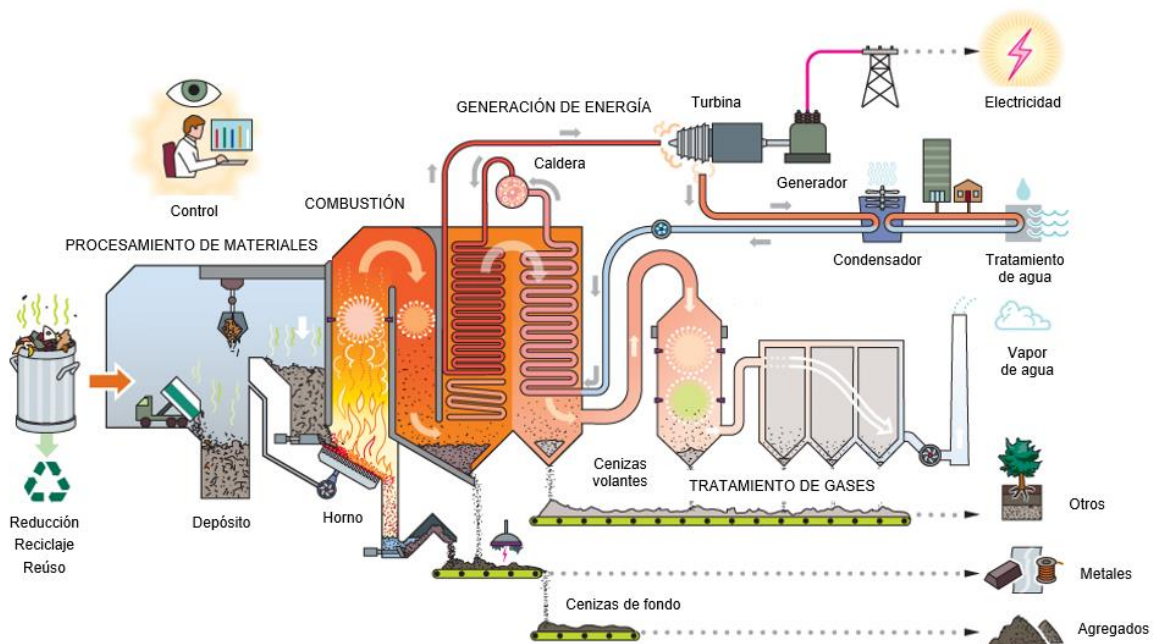
<sup>73</sup> Deltaway Energy.

<sup>74</sup> Environmental Leader.

<sup>75</sup> Columbia University.



### III.6 Generación de calor y electricidad



**Figura 10.** Flujo del proceso de gases y generación de energía<sup>76</sup>

Existen dos flujos de proceso principales en el intercambio de calor dentro de una planta de termovalorización para generar energía, ambos se pueden identificar en la Figura 10. El primero implica la reducción de temperatura de los gases de combustión al salir del horno, que ceden energía en forma de calor al agua. El segundo, el proceso de generación eléctrica, implica el sobrecalentamiento del agua al exponerse a la temperatura de los gases de combustión, para posteriormente dirigirse a una turbina para hacer girar sus hélices y activar el generador eléctrico.

Dentro del primer flujo de proceso, nos enfocamos en los gases en la salida del horno, estos calientan supercalentadores cuyos tubos pasan por las paredes del horno de parrilla, con este vapor sobrecalentado viniendo ya de la caldera y dirigiéndose directamente a la turbina. Regresando al flujo de gases de combustión, estos posteriormente elevan la temperatura de un recalentador cuya función es asistir en el calentamiento del vapor sobrecalentado previo a su llegada a la turbina. Finalmente, el economizador recibe el calor liberado por los gases al

<sup>76</sup> Imagen tomada de Deltaway Energy y traducida para mejor entendimiento.

final del horno de parrilla, prácticamente en la salida del horno, para alimentar también la fase líquida de la caldera con agua en temperatura de ebullición, haciendo el proceso del ciclo de agua mucho más eficiente dado que la fase líquida de la caldera contará con agua precalentada<sup>77</sup>.

Dentro del ciclo de agua y vapor, el primer contacto del agua en estado líquido con los gases de combustión es en el economizador al final del horno de parrilla. Ahí, el economizador eleva la temperatura del agua previo a su llegada a la caldera de alta presión, cuyas paredes consisten en tubos de acero que contienen agua precalentada. Dentro de la caldera, una vez obtenida una temperatura de ebullición por transferencia de calor con los gases de combustión, el vapor es dirigido a los supercalentadores colocados en las paredes del horno, donde el vapor tiene una máxima exposición a la temperatura y alcanza una condición de vapor sobrecalentado para dirigirse directamente a la turbina. En la turbina, el gas se expande para hacer girar un hélice y consecuentemente ocasiona la activación del generador eléctrico. Después de esto, el vapor pierde su temperatura a causa de su expansión y trabajo mecánico, y es dirigido hacia un condensador. En el condensador, una corriente de agua enfría el vapor de salida de la turbina para aprovechar su energía dentro de los sistemas de calefacción urbana. De no contar con la infraestructura necesaria para el aprovechamiento del calor por el intercambio en el condensador, se podrán utilizar también aerocondensadores utilizando la temperatura exterior como refrigerante en el intercambio de calor.

Para su recirculación en el sistema, una bomba de extracción lleva al agua de salida del condensador hacia un desgasificador con el objetivo de remover el oxígeno y otros gases disueltos en el agua. Finalmente, esta se bombea hacia un precalentador del agua de alimentación para ser dirigida hacia el economizador y continuar con el ciclo. Este proceso puede emplear recalentadores que aumentan la eficiencia del sistema y se colocan entre el economizador y los supercalentadores dentro del proceso de intercambio de calor con el gas de combustión. Estos recalentadores comúnmente asisten en mantener una

---

<sup>77</sup> Babcock & Wilcox Vølund.

temperatura adecuada del vapor previo a su entrada a las turbinas de generación eléctrica.

La medición del gas de combustión en la salida del economizador permitirá a los operadores evaluar la cantidad de aire en la mezcla de combustible en el proceso de combustión, permitiendo ajustarla con precisión si es que existe un exceso de aire afectando la temperatura o la composición del gas.

La energía producida con el calor liberado por los residuos es alrededor de 685 - 875 kWh (kilowatt hora) por tonelada<sup>78</sup>, empleando 339 kW·h durante el proceso<sup>79</sup>.

#### **CAPÍTULO IV. PRINCIPALES HALLAZGOS Y CONDICIONES DE ÉXITO DE UN PROCESO DE TERMOVALORIZACIÓN**

En suma, en un proceso de termovalorización de última generación, 400,000 toneladas de basura al año pueden convertirse en:

- 99% de eficiencia energética,
- electricidad para más de 60,000 casas,
- calefacción urbana para 160,000 hogares,
- 100 millones de litros de agua limpia recuperados a través de la condensación de los gases de salida,
- 10,000 toneladas de metales recuperados y
- 100,000 toneladas de cenizas de fondo reutilizables en industrias como la de la construcción.

Este es el resultado de la planta “Copenhill” construida en Dinamarca por Babcock & Wilcox Vølund<sup>80</sup>, una de las empresas líderes en termovalorización en el mundo. La planta cuenta con emisiones tan bajas y estándares de seguridad tan altos que

---

<sup>78</sup> Universidad Técnica de Dinamarca.

<sup>79</sup> Universidad Veracruzana.

<sup>80</sup> Babcock & Wilcox Vølund.

el gobierno danés le ha permitido contar con una zona de esquí y recreación en su parte alta. México, aunque no ha llegado a tener una planta con estos estándares de operación, hace algunos años tuvo la presentación de un proyecto de categoría mundial por parte de la empresa Veolia para tratar los residuos de la Ciudad de México. En este proyecto, se propone la construcción de una planta con la capacidad de procesar hasta 4,500 toneladas de basura diarias (1.6 millones de toneladas anuales) con el objetivo de generar 965,000 MW·h de electricidad por año para el Sistema de Transporte Colectivo Metro. El proyecto contaría con el cumplimiento de la IED y las Directivas Europeas de Emisiones, con un costo de 11 mil millones de pesos que sería cubierto por un consorcio liderado por Veolia<sup>81</sup>. El costo anual, para la ciudad, aunado al contrato por la recepción de residuos sólidos tendría un valor de 2,300 millones de pesos más IVA al año. Una cantidad similar a dos gastos que mitigaría la planta:

1. 600 millones de pesos por año relacionados al transporte de residuos urbanos a otros estados de la república.
2. Dos mil millones de pesos anuales en los que incurre el Sistema de Transporte Colectivo Metro<sup>81</sup>.

El programa debe ser visto en un panorama holístico y tomando en cuenta las implicaciones de corto y largo plazo de los acuerdos contractuales. Si bien la CDMX se comprometería a un acuerdo de entrega de residuos por alrededor de 30 años, también mitigaría la emisión de más de 700,000 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente al año, lo relativo a 19 millones de árboles sembrados<sup>82</sup>. Para analizar la factibilidad de esta y cualquier planta deben verse todos los factores que pueden verse afectados, tanto económicos como ambientales y sociales.

Como ejemplo, poner una nueva planta de termovalorización en Alemania, un país que recicla el 48% del total de su basura, hace composta del 18% de ella<sup>83</sup> e

---

<sup>81</sup> Veolia México.

<sup>82</sup> Veolia México

<sup>83</sup> Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development; Washington, DC: World Bank. © World Bank.

incinera eficientemente el 34% restante, probablemente no sería una inversión ambientalmente factible, ya que el porcentaje de basura en rellenos sanitarios es nulo y la planta tendría que alimentarse de los porcentajes anteriores. Además, probablemente tampoco sería atractivo el costo en la inversión y operación, ya que tendría que incurrir en gastos y regulaciones de importación de basura además de un probable problema de sobra de capacidad, aunado a que la generación por energías renovables en el país está muy por arriba de la media mundial, lo que quizá haría difícil competir como energía limpia en el sector. Por otro lado, en regiones como Latinoamérica, el 68.5% de la basura termina en rellenos sanitarios, con un adicional 26.8% en espacios abiertos no regulados<sup>83</sup>. Solo el daño causado por estas prácticas haría factible el proceso de termovalorización en el lado ambiental, y dado que la carrera por la producción de energía renovable, en porcentaje generado, no es tan avanzada como en Alemania, también lo podría volver factible del lado económico por incentivos de producción eléctrica limpia y facilidades de generación.

Dentro de los factores que intervienen en la viabilidad de un proyecto de termovalorización de residuos sólidos, están:

- la generación prospectiva de electricidad,
- el crecimiento esperado de la población,
- la velocidad de transición hacia la urbanización,
- los actuales y futuros programas de composta y reciclaje,
- la existencia de regulaciones ambientales precisas,
- las políticas de manejo de residuos,
- la inversión inicial contra la eficiencia en la generación esperada,
- la generación de energía eléctrica y calor esperados,
- la eficiencia de plantas de termovalorización existentes antes de la construcción de una nueva,

- el tratamiento y venta de residuos secundarios del proceso,
- el reciclaje efectivo de agua,
- las condiciones de salida de los humos,
- la tecnología de incineración/gasificación empleada en el proceso,
- el acceso a energías renovables en la región,
- la competencia en el costo de electricidad en la región (quizá existan fuentes de generación renovable más baratas),
- si existe o no un contrato de compraventa de energía y a qué precio,
- las tarifas de recolección de basura,
- subsidios del gobierno,
- patrones de generación de basura (si la tendencia apunta hacia un declive en producción de basura, probablemente no sea viable ni económica ni ambientalmente), y
- alternativas de manejo de basura, etc.

Es por esto por lo que definir en un “sí” o un “no” rotundo a la respuesta sobre la viabilidad del proceso es una inconciencia.

No es ni será nunca factible manejar el 100% de los residuos sólidos urbanos o industriales en plantas de termovalorización. El proceso no es un sustituto al reúso, al reciclaje o la composta, y mucho menos una solución a la economía insostenible de comprar, tirar, comprar. El proceso de termovalorización debe ser visto como una solución adicional para la incapacidad de solucionar los problemas anteriores. Si se habla de forma utópica del manejo de residuos, entonces definitivamente la solución estaría en los puntos mencionados anteriormente (reutilización, reciclaje y composta), pero al hacer un acercamiento a solucionar un problema humano incrementalmente preocupante y real que se necesita abordar de forma inmediata, entonces “sí”, en condiciones reguladas y estudiadas, es

necesario acudir a la tecnología de termovalorización. Esto idealmente en una regulación uniforme a nivel mundial que estandarice las condiciones de salida de los procesos, para cuidar y asegurar la calidad de suelos y aire.

A nivel mundial, los rellenos sanitarios son responsables de alrededor del 16% de las emisiones totales de metano liberadas a la atmósfera, únicamente detrás de la producción de combustibles fósiles y la industria del ganado<sup>84</sup>. Esto quiere decir que cada año se liberan a la atmósfera cientos de millones de toneladas de un gas de efecto invernadero 28 a 36 veces más efectivo<sup>85</sup> que el CO<sub>2</sub> en captar el calor del Sol como resultado de malas prácticas de almacenamiento de basura. Esto no solo representa un riesgo directo para el ambiente y la humanidad, si no una oportunidad perdida de generación de energía; añadido a la cantidad de CO<sub>2</sub> que también liberan estos rellenos de cielo abierto y las consecuencias ambientales que se describieron al inicio del trabajo.

Es preciso reconocer que México en los últimos años ha hecho un esfuerzo para reducir el daño que causan los residuos en el país. Se han efectuado leyes como la “Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos” (LGPGIR) a la par de proyectos como el “Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de Residuos” que establecen un antecedente y un modelo bajo los que se rigen los esfuerzos de recolección y manejo de residuos en el país. Uno de los programas que surgió a partir de estos esfuerzos fue el “Programa Estatal de Gestión Integral de Residuos de Nuevo León”, que estableció un análisis sobre el manejo de los residuos en el estado y a su vez impulsó movimientos ciudadanos y estatales para prevenir el mal manejo de desechos en la región.

Dentro de la LGPGIR se establece también la propiedad y responsabilidad en la gestión de los residuos sólidos en el país. En este documento se reconoce que la producción de residuos es consecuencia de actividades sociales y por lo tanto es corresponsabilidad de la sociedad, organismos privados y gubernamentales el tener una correcta gestión de los mismos para garantizar procesos factibles

---

<sup>84</sup> Agencia de Protección del Medio Ambiente (EUA).

<sup>85</sup> Agencia de Protección del Medio Ambiente (EUA).

económica, ecológica, social y ambientalmente<sup>86</sup>. No obstante, indica que los municipios son los responsables finales de la gestión de residuos sólidos, de poner en marcha reglamentos que hagan cumplir la ley bajo su jurisdicción y de otorgar las concesiones necesarias para el manejo de basura al marco de la ley<sup>86</sup>.

Algunas de las normas aplicables más relevantes para este tema y tipo de residuos son<sup>87</sup>:

- NOM-098-SEMARNAT-2002: Protección ambiental - incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.
- NOM-083-SEMARNAT-2003: Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
- NOM-052-SEMARNAT-2005: Establece las características y procedimiento de identificación de los residuos peligrosos.
- NOM-053-SEMARNAT-1993: Establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Aún con estas normas y esfuerzos, México forma parte de la lista de países con mayores emisiones de metano ligadas a la mala manutención de los rellenos sanitarios. En 2010, estaba únicamente detrás de Estados Unidos y China<sup>88</sup>, países con urbanizaciones y poblaciones mucho mayores a las de México. ¿Cómo no estaría ahí?, con el segundo relleno sanitario a cielo abierto más grande del mundo en Bordo Poniente, Ciudad de México. Se estima que 70 millones de toneladas de desperdicio están dispersas en 375 hectáreas de basura<sup>89</sup> con hasta

---

<sup>86</sup> Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

<sup>87</sup> Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

<sup>88</sup> Global Methane.

<sup>89</sup> World Atlas.



17 metros de profundidad<sup>90</sup>. No es necesario hacer el cálculo del tiempo requerido para separar, buscar reutilizar (si es que algo ahí es reutilizable ya que los desechos tienen hasta 30 años ahí), reciclar o compostar lo que está vertido como para saber que no solo es una tarea interminable y con continuas repercusiones desastrosas para el ambiente, si no también muy peligrosa y dañina para las personas que la llevarían a cabo.

Esto pasa en México, en los mares y océanos (como en el Pacífico<sup>91</sup>, donde flota una “isla” de basura de más de 1.1 millones de kilómetros cuadrados, tres veces la superficie de Francia<sup>92</sup> esperando a ser recogida), en los cientos de miles de tiraderos no regulados y hasta en los innumerables rellenos sanitarios regulados alrededor del mundo, donde la infraestructura y los pepenadores apenas se dan abasto para manipular y separar de forma mínimamente higiénica y segura las miles de toneladas que llegan en el día a día. Es en estos casos en los que se necesita, para un problema de escalas inmanejables, un sistema de niveles equivalentes dispuesto a consumirlas y convertirlas en energía, mitigando enormemente el riesgo ambiental, generando recursos de valor agregado y ateniéndose a regulaciones de productos secundarios que se pueden reutilizar o se vuelven prácticamente inertes cuando salen.

La respuesta de la oposición es clara, si se crea un proceso que dé valor secundario a la basura sin separaciones ni catalogación, entonces (i) se desincentivaría la reutilización, reciclaje y composta de los residuos, algo mucho más benéfico como parte de una economía circular y (ii) se crearía (o alimentaría) la idea que dictamina que los bienes materiales son dispensables y que no hay problema en tomar cada vez más del planeta dado que ya hay un mercado secundario de valor donde es posible depositarlo. Esta visión es correcta, el primer paso que debe darse antecede al proceso de generación de basura, y es educar a la población en sus hábitos de consumo. El segundo debe ser separar, reutilizar, reciclar y compostar los residuos adecuadamente, y el tercero debe entonces ser

---

<sup>90</sup> BBC News.

<sup>91</sup> National Geographic.

<sup>92</sup> The Ocean Cleanup.

el proceso de termovalorización. Los primeros dos pasos requieren de una inversión importante de tiempo en educación e implementación que simplemente no tiene la escalabilidad necesaria para combatir un problema de este tipo de forma inmediata como es necesario. El tercer paso, en cambio, tiene la capacidad de hacer algo al respecto antes de que (o mientras) el problema de la basura se salga de control.

La educación en el consumo y depósito de residuos debe iniciarse desde ahora y debe apalancarse para atacar el problema de basura de forma desacelerada y en el largo plazo. La termovalorización es una solución tangible que puede proponer soluciones factibles al entorno ambiental, energético y económico de muchas regiones en el corto y mediano plazo. ¿Y por qué no?, siendo realistas, en muchas comunidades la producción inmanejable de basura no cesará, es ahí donde entonces estos procesos asistirán en el largo plazo también. Es necesario atacar el problema ambiental por varias frentes, evaluar cada posibilidad dentro de su panorama circunstancial, y así cuidar al planeta con soluciones de corto y largo plazo.

Las plantas de termovalorización no son un tema nuevo, pero se han vuelto un tópico incrementalmente popular a nivel mundial por su importante diseminación en los últimos años, sobre todo en países desarrollados. Parte de esta controversia es debido a cierta ignorancia sobre el proceso y su funcionalidad, otra fracción viene justificada por malas prácticas que se han dado (tanto regulatorias como tecnológicas) en algunos procesos de termovalorización alrededor del mundo. Un fragmento amplio de esta polémica existe dado que algunas de estas plantas tienen acuerdos millonarios con los gobiernos sobre el manejo de la basura municipal, en las que las entidades deben comprometerse a alimentar a las plantas con una cantidad “x” de basura mientras se comprometen a consumir una cantidad “y” de energía. Tal es el caso de la planta de termovalorización en la Ciudad de México que se presentó anteriormente. Este tipo de acuerdos podrían ocasionar que los gobiernos tengan un bajo incentivo en crear programas de separación, reutilización, reciclaje y composta de basura, al tener una “cuota” de

generación a cubrir con estas plantas, y disminuir su interés por desarrollar otros tipos de energía limpia.

Es por esto por lo que antes de abrir una de estas plantas se deben de tomar en cuenta los factores mencionados anteriormente para asegurar que el proceso resuelve y se anticipa de forma justa a un problema de manejo de basura. El cual en muchas veces será el caso, y existirá una planta de generación de energía con un propósito ambiental y económico real y medible a corto y largo plazo, evitando el exceso de capacidad y propinando una solución sostenible para la basura que de otra forma terminaría en manejos inadecuados. Esto requerirá que las plantas y sus contratos tengan una regulación correcta, aunada a una limitación demográfica y geográfica de plantas dependiente de la proyección real de basura y su manejo.

Existen otros argumentos en contra de los procesos de termovalorización. Válidos como se menciona, en ciertas circunstancias, y necesarios para formar un panorama completo de las “ventajas y desventajas” del proceso. Algunos de ellos están implícitos en la viabilidad del proceso y no toman en cuenta que la viabilidad de la termovalorización depende de factores tanto externos como internos. Algunos ejemplos son:

- La basura como combustible no efectivo
- Proceso propenso a producir desechos tóxicos
- Energía eléctrica liberada no es una fuente renovable, ya que depende de la generación de basura cuando no es un recurso natural infinito (Debatible para el 50% aproximado de basura que es quemada como biomasa)
- Las plantas como carga financiera

Todos estos argumentos<sup>93</sup> tienen la cualidad inválida mencionada anteriormente, y es que ninguno de ellos es correcto para todos los casos, y es una irresponsabilidad argumentar que los son. Las plantas de termovalorización deben

---

<sup>93</sup> Zero Waste Europe.

ser evaluadas bajo los parámetros mencionados caso por caso, y solo así es posible encontrar soluciones verdaderas al problema ecológico enfrentado.

Es innegable que este proceso tiene un potencial enorme para manejar las miles de millones de toneladas de basura existente en el mundo. Con certeza, si las mejores prácticas descritas a lo largo del documento son llevadas a cabo, las plantas de termovalorización pueden mitigar enormes riesgos ambientales y proponer grandes beneficios para el planeta, a la par de ser inversiones financieras inteligentes. La planeación correcta de las plantas, la limitación de su desmesurada existencia en ciertas regiones, la eficiencia del proceso, las regulaciones para reutilizar los subproductos generados y las normativas de orden mundial para la salida de humos son factores esenciales que pueden determinar si las plantas son un absoluto éxito, o un indeseable fracaso.

No se deben aflojar los estándares de seguridad internacional para argumentar la viabilidad de llevar el proceso a cabo. Deben todas las plantas y proyectos estar medidos bajo el mismo estándar de calidad. Se debe, antes de construir nuevas plantas, hacer más eficientes y menos contaminantes las existentes. Se debe obligar a que todas las plantas formen asociaciones con compañías adyacentes que les den un segundo uso a los subproductos del proceso, con acuerdos de utilización y manejo regulados por según la soberanía de cada país, pero con un acuerdo internacional riguroso. Este es un proceso mucho más contenido y regulable que la dispersión actual de basura y la ambigüedad de su manejo y normativas, es posible actuar al respecto para establecer las normas y evitar la negligencia regulatoria en cualquier parte del planeta.

El planeta es visto por la mayoría de las personas como una fuente de recursos inacabable que no presenta repercusiones por las actividades humanas. Se vive una cultura de máxima exposición a la información y mínimo interés en ella, en entender las repercusiones de la cotidiana realidad. Este proceso de termovalorización tiene un alto potencial de cambio, pero uno mucho mayor lo tienen los hábitos que conforman el día a día de la sociedad. El paso número uno deber ser siempre no generar, no promover la extracción de materia de la tierra, reusar, sin afectar ni transformar la materia prima, reciclar o compostar, y

finalmente emplear procesos de mitigación de afectaciones ambientales. Hay muchas formas de hacer un acercamiento responsable hacia los residuos generados, pero dejarlos en un relleno sanitario no es una solución.

Muchos de los principales rellenos sanitarios alrededor del mundo están alcanzando su límite de capacidad, la cantidad de basura que albergan los lleva a formar parte de las edificaciones humanas más grandes de la historia, con deslaves e incendios que han matado a miles de personas. A este paso, ¿Dónde se albergarán las 20 mil millones de toneladas de basura que se generarán en los siguientes 10 años? ¿Es realista o por lo menos medianamente inteligente pensar que se irá de 27% de aprovechamiento de los residuos a nivel mundial (actual sumatoria de reciclaje, composta y captura de gases en rellenos controlados)<sup>83</sup> hasta un 100%? ¿Cómo se tratarán las millones de toneladas de residuos existentes? ¿Cómo se hará atractiva su recolección y salida de los ecosistemas? Es necesario hacer todas estas preguntas sabiendo que la capacidad de cambio tendría que formarse en un lapso limitado para países en vías de desarrollo cuyas prioridades humanitarias son incontables y su atractivo de inversión no es el mayor para implementar proyectos de reciclaje o composta. Es necesario actuar, y en muchas ocasiones las plantas de termovalorización son la mejor opción.

Se debe tomar la iniciativa, delimitar la oportunidad, estudiar la factibilidad, comparar alternativas de manejo de basura y generación de electricidad, analizar la condición de residuos actual, identificar el precio de la electricidad, atraer a compañías certeras y con tecnología de punta, ajustar las regulaciones, verificar si la plantas de termovalorización existentes ya están en su eficiencia máxima, y si resulta bueno para el ambiente y atractivo para los inversionistas entonces se debe edificar una planta. El proceso y la tecnología actual permiten calcular con certeza la necesidad en la construcción de una planta, con la posibilidad de reducir el volumen de residuos pasados, presente y futuros hasta en un 90%.

Nunca debe verse este proceso como una competencia hacia otras alternativas de manejo de basura responsable. La termovalorización es un proceso comprometido con el ambiente en sus mejores prácticas, pero no es sostenible manejar todos nuestro residuos de esta manera. Es necesario reducir el paso de producción de

basura. La mejor solución es dejar de generarla, dejar de alimentar hábitos sin fin. De esta forma, no habría necesidad de iniciar un ciclo de tratamiento de la producción porque el mismo inicio se comprime. Es preciso impulsar una cultura de poco consumo, alto reciclaje y conciencia ambiental, para que cada vez sean menos necesarias estas tecnologías de termovalorización, para que cada vez se extraigan menos recursos del planeta y para que lo que tenga la Tierra hoy, lo conserve para siempre.

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES**

El proceso de termovalorización, según se analizó, tiene dos flujos primordiales: El primero, y posiblemente más relevante, es el del tratamiento de gases y cenizas que ocurren como efecto de la incineración de basura. El segundo, el de generación de energía eléctrica a partir de turbinas de vapor que se ven activadas por el paso de vapor sobrecalentado que se forma a partir de un intercambio de calor con los gases de combustión. Todo el proceso puede ser complementado por distintos equipos de asistencia que pueden hacer más efectiva cada una de las fases de estos dos procesos, identificarlas, para complementarlas, supondrá un avance importante en la sofisticación de cada una de las plantas de termovalorización.

La factibilidad económica y ambiental en la implementación y operación de una planta de termovalorización no es binaria. Sería incorrecto argumentar que bajo cualquier espacio condicional es favorable o impugnable ecológica o económicamente la construcción de una planta de “deshechos a energía”, ya que su rentabilidad y balance ambiental y económico dependen directamente de las características de los lugares en donde se buscan implementar estas tecnologías.

La creciente popularidad de los procesos de termovalorización a nivel mundial ha creado un mercado de alta competencia en el que empresas líderes del sector han sido capaces de desarrollar tecnologías cada vez más eficientes que han acelerado su permeabilidad en varias geografías, principalmente en países desarrollados. Esto abre paso a un futuro interesante para los procesos de

termovalorización en el que su propuesta de valor puede llegar a competir con la de las principales fuentes de energía alternativa que compiten por el mercado energético en el mundo.

Después de estudiado el proceso, y analizado su capacidad de adaptación dentro de cada etapa, es claro que existe una oportunidad para desarrollar planes de implementación, económica y ecológicamente responsables, en varias partes del mundo, que puedan asistir al creciente y preocupante problema de basura y energía que existe en el planeta. Este proceso tiene un gran potencial de intervenir positivamente en el ambiente y con un caso de negocio responsable también puede ser benéfico para la sociedad y la economía. Cuando las campañas de disminución de desechos y reutilización de basura no se muestren exitosas, es responsabilidad de cada geografía establecer políticas rigurosas y planes de operación responsables que permitan que estas plantas puedan asistir a un problema incesante que pone en riesgo la vida de todos los seres en el planeta.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**DEHA** – Dietilhidroxilamina; compuesto orgánico que puede provocar cáncer.

**IPCC** – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés “*Intergovernmental Panel on Climate Change*”).

**IRENA** – Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA por sus siglas en inglés “*International Renewable Energy Agency*”).

**PRODESEN** – Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional

**IED** – Directiva de Emisiones Industriales (IED por sus siglas en inglés “*Industrial Emission Directive*”).

**IVA** – Impuesto sobre el valor agregado.

**NOM** – Normas Oficiales Mexicanas; regulaciones técnicas obligatorias.

## BIBLIOGRAFÍA

### INTRODUCCIÓN

1. El Banco Mundial (Mayo 2019) Manejo de residuos sólidos.  
<http://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>
3. El Banco Mundial - Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. Urban Development; Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>  
License: CC BY 3.0 IGO.
5. Periódico La Jornada (Mayo 2019) Se generan en México 103 mil toneladas de basura cada día.



<https://www.jornada.com.mx/ultimas/2018/12/17/se-generan-en-mexico-103-mil-toneladas-de-basura-cada-dia-4657.html>

6. El Economista (Mayo 2019) Industria del reciclaje de plásticos está en auge en México.  
<https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Industria-del-reciclaje-de-plasticos-esta-en-auge-en-Mexico-20181029-0115.html>
7. Gobierno de México (Mayo 2019) Tiraderos a cielo abierto dañan ambiente y salud humana.  
<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/tiraderos-a-cielo-abierto-danan-ambiente-y-salud-humana?idiom=es>
8. Periódico El Universal (Mayo 2019) El 70% de la basura en México termina en cuerpos de agua o bosques: SEMARNAT.  
<https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/el-70-de-la-basura-en-mexico-termina-en-cuerpos-de-agua-o-bosques-semarnat>
9. McKinsey & Company (Mayo 2019) Perspectiva global de energía 2019.  
<https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2019>

## **CAPÍTULO I. PANORAMA ACTUAL DEL MANEJO Y DESTINO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS Y SUS REPERCUSIONES SOBRE EL AMBIENTE**

10. El Banco Mundial (Mayo 2019) Los desechos globales crecerán en un 70% para 2050 a menos que se tomen medidas urgentes: Informe del Banco Mundial.  
<https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>
11. El Banco Mundial (Mayo 2019) Manejo de residuos sólidos.  
<http://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>

12. El Banco Mundial - Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. Urban Development; Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>  
License: CC BY 3.0 IGO.
13. National Geographic (Mayo 2019) Un 91% del plástico no se recicla.  
<https://news.nationalgeographic.com/2017/07/plastic-produced-recycling-waste-ocean-trash-debris-environment/>
14. Agencia de Protección del Medio Ambiente EUA (Mayo 2019) Impactos de la basura mal administrada.  
<https://www.epa.gov/trash-free-waters/impacts-mismanaged-trash>
15. Periódico La Jornada (Mayo 2019) Basura causa 50% de inundaciones en CDMX.  
<https://www.jornada.com.mx/ultimas/2018/08/13/basura-causa-50-de-inundaciones-en-cdmx-7529.html>

## **CAPÍTULO II. PANORAMA ENERGÉTICO ACTUAL, EFECTOS ADVERSOS SOBRE EL AMBIENTE Y HORIZONTE DE ENERGÍAS RENOVABLES**

16. Agencia de Protección del Medio Ambiente EUA (Junio 2019) Datos globales de emisiones de gases de efecto invernadero.  
<https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>
17. NASA (Junio 2019) Los efectos del cambio climático.  
<https://climate.nasa.gov/effects/>
18. Fondo Mundial para la Naturaleza (Junio 2019) ¿Cuántas especies estamos perdiendo?  
[http://wwf.panda.org/our\\_work/biodiversity/biodiversity/](http://wwf.panda.org/our_work/biodiversity/biodiversity/)
20. Acciona (Junio 2019) Descubre lo que es el cambio climático y como te afecta.  
<https://www.acciona.com/climate-change/>

21. National Geographic (Junio 2019) La mitad de la gran barrera de coral está muerta.  
<https://www.nationalgeographic.com/magazine/2018/08/explore-atlas-great-barrier-reef-coral-bleaching-map-climate-change/>
22. Consejo para la Defensa de los Recursos Naturales EUA (Junio 2019) ¿Tan nocivos son realmente los efectos del calentamiento global?  
<https://www.nrdc.org/es/stories/tan-nocivos-son-realmente-efectos-calentamiento-global>
23. Agencia Europea del Medio Ambiente (Junio 2019) Emisiones de gases de efecto invernadero del transporte en Europa.  
<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-11>
24. McKinsey & Company (Mayo 2019) Perspectiva Global de Energía 2019.  
<https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2019>
25. Agencia Internacional de Energías Renovables (Junio 2019) Energía solar.  
<https://www.irena.org/solar>
26. Forbes (Junio 2019) Si los paneles solares son tan limpios, ¿Por qué producen tantos desechos tóxicos?  
<https://www.forbes.com/sites/michaelshellenberger/2018/05/23/if-solar-panels-are-so-clean-why-do-they-produce-so-much-toxic-waste/#22eff79f121c>
28. Agencia Internacional de Energías Renovables (Junio 2019) Gestión de fin de vida útil: Paneles solares fotovoltaicos.  
<https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
29. Agencia Internacional de Energías Renovables (Junio 2019) Energía eólica.  
<https://www.irena.org/wind>

30. National Geographic (Junio 2019) Energía eólica.  
<https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/wind-power/>
31. Wind Europe (Junio 2019) Viento en el poder 2017.  
<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2017.pdf>
32. Departamento de Energía de Estados Unidos (Junio 2019) Ventajas y desafíos de la energía eólica.  
<https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy>
33. Agencia Internacional de Energía (Junio 2019) Energía hidroeléctrica.  
<https://www.iea.org/topics/renewables/hydropower/>
34. Forbes México (Junio 2019) México no puede depender solo de energía hidroeléctrica: GE.  
<https://www.forbes.com.mx/mexico-no-puede-depender-solo-de-energia-hidroelectrica-ge/>
35. Agencia Internacional de Energías Renovables (Junio 2019) Energía hidroeléctrica.  
<https://www.irena.org/hydropower>
36. National Geographic (Junio 2019) Hidroelectricidad, explicada.  
<https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/hydropower/>
37. Forbes (Junio 2019) Los impactos inesperadamente grandes de hidroeléctricas pequeñas.  
<https://www.forbes.com/sites/jeffopperman/2018/08/10/the-unexpectedly-large-impacts-of-small-hydropower/#35e9f6227b9d>
38. PRODESEN (Julio 2019) Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional.  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>

## **CAPÍTULO III. PROCESO DE TERMOVALORIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS**

### **III.1 Introducción y visión general del proceso**

40. Administración de Información Energética de los Estados Unidos (Julio 2019) Biomasa explicada. Residuos-a-energía (Residuos sólidos municipales).  
<https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/waste-to-energy-in-depth.php>

41. Confederación Europea de Plantas de Termovalorización (Julio 2019) ¿Qué es la termovalorización?  
<http://www.cewep.eu/what-is-waste-to-energy/>

42. Reciclame España (Julio 2019) Incineración.  
<http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/incineracion/>

### **III.2 Recolección y consumo de residuos sólidos**

43. El Banco Mundial - Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. Urban Development; Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>  
License: CC BY 3.0 IGO.

44. Administración de Información Energética de los Estados Unidos (Julio 2019) Biomasa explicada. Residuos-a-energía (Residuos sólidos municipales).  
[https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=biomass\\_waste\\_to\\_energy#tab1](https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=biomass_waste_to_energy#tab1)

45. Deltaway Energy (Julio 2019) Desechos a Energía: Como Funciona.  
<https://deltawayenergy.com/2018/08/waste-to-energy-how-it-works/>

46. Reciclame España (Julio 2019) Incineración.  
<http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/incineracion/>

### **III.3 Incineración de residuos sólidos**

47. Babcock & Wilcox Vølund (Julio 2019) Tecnologías de calderas.  
[http://www.volund.dk/Waste\\_to\\_Energy/Technologies/Boiler\\_technologies](http://www.volund.dk/Waste_to_Energy/Technologies/Boiler_technologies)
48. Universidad Veracruzana (Julio 2019) Residuos Sólidos Urbanos: Alternativas de Tratamiento.  
<https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol29num3/articulos/Residuos-solidos-urbanos.html>
49. Recicla España (Julio 2019) Incineración.  
<http://www.reciclae.info/gestion-de-residuos-2/incineracion/>
50. Babcock & Wilcox Vølund (Julio 2019) ¿Qué es la termovalorización?  
<https://www.babcock.com/en/industry/waste-to-energy>
51. Agencia de Protección del Medio Ambiente EUA (Julio 2019) Desechos - Residuos no Peligrosos - Residuos Sólidos Municipales.  
<https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/html/basic.html>

#### **III.4 Tratamiento y salida de gases**

52. Agencia de Protección del Medio Ambiente EUA (Julio 2019) Desechos - Residuos no Peligrosos - Residuos Sólidos Municipales.  
<https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/html/basic.html>
53. Confederación Europea de Plantas de Termovalorización (Julio 2019) ¿Qué es la termovalorización?  
<http://www.cewep.eu/what-is-waste-to-energy/>
54. Babcock & Wilcox Vølund (Julio 2019) Como funciona la termovalorización.  
[http://www.volund.dk/Waste\\_to\\_Energy/How\\_it\\_works](http://www.volund.dk/Waste_to_Energy/How_it_works)
55. New York Times (Julio 2019) Europa encuentra energía limpia en la basura, pero Estados Unidos se atrasa.  
<https://www.nytimes.com/2010/04/13/science/earth/13trash.html>
56. Deltaway Energy (Julio 2019) Desechos a Energía: Como Funciona.  
<https://deltawayenergy.com/2018/08/waste-to-energy-how-it-works/>

57. Energy Education (Julio 2019) Separador ciclónico.  
[https://energyeducation.ca/encyclopedia/Cyclone\\_separator](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Cyclone_separator)
58. EEW “Energy from Waste” Alemania (Julio 2019) Energía de desechos.  
<https://www.eew-energyfromwaste.com/en/environment/flue-gas-cleaning.html>
59. Enciclopedia Británica (Julio 2019) Precipitador electrostático.  
<https://www.britannica.com/technology/electrostatic-precipitator>
60. Gamoher Environmental (Julio 2019) Filtros de mangas.  
<http://www.gamoher.com/index.php/filtros-de-mangas-2/>
61. Babcock & Wilcox Vølund (Julio 2019) Sistemas de inyección de sorbentes secos.  
<https://www.babcock.com/en/products/sorbent-injection-systems>
62. Enciclopedia Británica (Julio 2019) Tratamiento de gases de combustión.  
<https://www.britannica.com/technology/flue-gas-treatment>
63. EEW “Energy from Waste” Alemania (Julio 2019) Energía de desechos.  
<https://www.eew-energyfromwaste.com/en/environment/flue-gas-cleaning.html>
64. Science Direct Journals (Julio 2019) Reducción Catalítica Selectiva.  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/selective-catalytic-reduction>
65. Babcock & Wilcox Vølund (Julio 2019) Sistemas de lavado.  
<http://www.gmab.se/flue-gas-cleaning/scrubber-systems/>
66. Babcock & Wilcox Vølund (Julio 2019) Sistemas de desulfurización de gases de humos húmedos.  
<https://www.babcock.com/en/products/wet-scrubbers-fgd>
67. Babcock & Wilcox Vølund (Julio 2019) Aguas Residuales.  
<https://www.babcock.com/en/products/wastewater-treatment>

### **III.5 Recolección y manejo de lodos y cenizas**

68. Confederación Europea de Plantas de Termovalorización (Julio 2019) Hoja informativa de cenizas de fondo.  
<http://www.cewep.eu/bottom-ash-factsheet/>
69. Waste Management World (Julio 2019) Residuos a energía: La perspectiva del carbono.  
<https://waste-management-world.com/a/waste-to-energy-the-carbon-perspective>
70. CNN (Julio 2019) A bordo del crucero más grande del mundo.  
<https://edition.cnn.com/travel/article/harmony-of-the-seas-worlds-biggest-cruise-ship/index.html>
71. Confederación Europea de Plantas de Termovalorización (Julio 2019) Hoja informativa de cenizas de fondo.  
<http://www.cewep.eu/bottom-ash-factsheet/>
72. Universidad Técnica de Dinamarca (Julio 2019) Desechos a energía, la perspectiva del carbono.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/43248568.pdf>
73. Deltaway Energy (Julio 2019) Desechos a Energía: Como Funciona.  
<https://deltawayenergy.com/2018/08/waste-to-energy-how-it-works/>
74. Environmental Leader (Julio 2019) Usos favorables para la ceniza reciclada de procesos de termovalorización.  
<https://www.environmentalleader.com/2016/10/beneficial-uses-for-recycled-waste-to-energy-ash/>
75. Columbia University (Julio 2019) El ABC de la Gestión de Residuos.  
<http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/faq.html>

### **III.6 Generación de calor y electricidad**

76. Deltaway Energy (Julio 2019) Desechos a Energía: Como Funciona.  
<https://deltawayenergy.com/2018/08/waste-to-energy-how-it-works/>



77. Babcock & Wilcox Vølund (Julio 2019) Economizador.  
<https://www.babcock.com/en/products/economizer>
78. Universidad Técnica de Dinamarca (Julio 2019) Desechos a energía, la perspectiva del carbono.  
<https://core.ac.uk/download/pdf/43248568.pdf>
79. Universidad Veracruzana (Julio 2019) Residuos Sólidos Urbanos: Alternativas de Tratamiento.  
<https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol29num3/articulos/Residuos-solidos-urbanos.html>

#### **CAPÍTULO IV. PRINCIPALES HALLAZGOS Y CONDICIONES DE ÉXITO DE UN PROCESO DE TERMOVALORIZACIÓN**

80. Babcock & Wilcox Vølund (Noviembre 2019) ARC, Copenhille / Amager Bakke, Copenhague, Dinamarca.  
[http://www.volund.dk/Waste\\_to\\_Energy/References/ARC\\_Amager\\_Bakke\\_Copenhagen](http://www.volund.dk/Waste_to_Energy/References/ARC_Amager_Bakke_Copenhagen)
81. Veolia México (Noviembre 2019) El Proyecto.  
<https://www.veolia.com.mx/termocdmx/el-proyecto>
82. Veolia México (Noviembre 2019) ¿Cómo sería la CDMX sin la Planta de Termovalorización?  
[https://www.veolia.com.mx/termocdmx/sites/g/files/dvc2021/files/document/2018/08/Como\\_seria\\_la\\_CDMX\\_sin\\_la\\_Planta\\_de\\_Termovalorizacion\\_PDF\\_0.pdf](https://www.veolia.com.mx/termocdmx/sites/g/files/dvc2021/files/document/2018/08/Como_seria_la_CDMX_sin_la_Planta_de_Termovalorizacion_PDF_0.pdf)
83. El Banco Mundial - Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development; Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>  
License: CC BY 3.0 IGO.

84. Agencia de Protección del Medio Ambiente EUA (Julio 2019) Resumen de gases de efecto invernadero: Emisiones de metano.  
<https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#methane>
85. Agencia de Protección del Medio Ambiente EUA (Julio 2019) Información Básica sobre Gases de Vertederos.  
<https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>
86. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2003) reforma D.O.F. del 19-01-2018. (Noviembre 2019) Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.  
[http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263\\_190118.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_190118.pdf)
87. Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2017-2018 (Noviembre 2019) Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2017-2018.  
<http://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/PNPGIR%202017-2018.pdf>
88. Global Methane (Julio 2019) Metano en vertederos: Reduciendo emisiones, avanzando en recuperación y usando oportunidades.  
[https://www.globalmethane.org/documents/landfill\\_fs\\_eng.pdf](https://www.globalmethane.org/documents/landfill_fs_eng.pdf)
89. World Atlas (Julio 2019) Los vertederos más grandes del mundo.  
<https://www.worldatlas.com/articles/largest-landfills-waste-sites-and-trash-dumps-in-the-world.html>
90. BBC News (Julio 2019) Ciudad de México cierra vertedero de basura Bordo Poniente.  
<https://www.bbc.com/news/world-latin-america-16258472>
91. National Geographic (Julio 2019) Gran Parche de Basura del Pacífico.  
<https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/great-pacific-garbage-patch/>
92. The Ocean Cleanup (Julio 2019) El Gran Parche de Basura del Pacífico.  
<https://www.theoceancleanup.com/great-pacific-garbage-patch/>

93. Zero Waste Europe (Julio 2019) Nueve razones por las que debemos alejarnos de la termovalorización y adoptar el desperdicio cero.

<https://zerowasteurope.eu/2018/02/9-reasons-why-we-better-move-away-from-waste-to-energy-and-embrace-zero-waste-instead/>