

## TRABAJO FINAL INTEGRADOR

# Análisis del riesgo ambiental de las tecnologías de incineración de residuos urbanos



*“No hay dos crisis separadas, una ambiental y otra social, sino una sola y compleja crisis socio ambiental. Las líneas para la solución requieren una aproximación integral para combatir la pobreza, para devolver la dignidad a los excluidos y simultáneamente para cuidar la naturaleza”. (Papa Francisco. Encíclica Laudato Si’ “El cuidado de la casa común”, 2015)*

### **Resumen**

*La contaminación originada por intermedio de las incineradoras constituye, un aspecto potencialmente, muy importante. Conocer los riesgos ayuda a tomar decisiones para minimizar los impactos ambientales.*

### **Abstract**

*The pollution originating from incinerators is potentially a very important aspect. Knowing the risks helps make decisions to minimize environmental impacts.*



## Índice

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.  | Introducción                                 | 03 |
| 2.  | Objeto de estudio                            | 05 |
| 3.  | Planteamiento del problema                   | 06 |
| 4.  | Descripción de las técnicas más comunes      | 06 |
| 5.  | Justificación                                | 21 |
| 6.  | Enfoque del estudio                          | 31 |
| 7.  | Método de investigación                      | 47 |
| 8.  | Resultados                                   | 48 |
| 9.  | Conclusiones                                 | 53 |
| 10. | Consideraciones para futuras investigaciones | 61 |
| 11. | Conclusión Personal                          | 66 |
| 12. | Bibliografía / Fuentes                       | 71 |

## Listado de Abreviaturas

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>AFR</b>            | Materias primas y combustibles alternos               |
| <b>CDR</b>            | Combustible derivado de residuos                      |
| <b>CH<sub>4</sub></b> | Metano  |
| <b>CHP</b>            | Unidad de Cogeneración                                |
| <b>CO</b>             | Monóxido de carbono                                   |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Dióxido de carbono                                    |
| <b>CSR</b>            | Combustibles sólidos recuperados                      |
| <b>CWG</b>            | Grupo Colaborativo de Trabajo                         |
| <b>DA</b>             | Digestión anaerobia                                   |
| <b>GRS</b>            | Gestión de Residuos Sólidos                           |
| <b>GRS</b>            | Gas de relleno sanitario                              |
| <b>GRSU</b>           | Gestión de residuos sólidos urbanos                   |
| <b>HCl</b>            | Ácido clorhídrico                                     |
| <b>HF</b>             | Ácido fluorhídrico                                    |
| <b>IRSU</b>           | Incineración de residuos sólidos urbanos              |
| <b>MDL</b>            | Mecanismo de Desarrollo Limpio                        |
| <b>MDS</b>            | Meta de desarrollo sustentable                        |
| <b>MTD</b>            | Mejor técnica disponible                              |
| <b>NAMA</b>           | Acciones nacionales apropiadas de mitigación          |
| <b>NO<sub>x</sub></b> | Óxidos de nitrógeno                                   |
| <b>ODS</b>            | Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas |
| <b>ONG</b>            | Organizaciones no gubernamentales                     |
| <b>OyM</b>            | Operaciones y mantenimiento                           |
| <b>PCI</b>            | Poder calorífico inferior                             |
| <b>PET</b>            | Tereftalato de polietileno                            |
| <b>PVC</b>            | Cloruro de polivinilo                                 |
| <b>RS</b>             | Relleno sanitario                                     |

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>RSU</b>            | Residuo sólido urbano                                      |
| <b>SO<sub>2</sub></b> | Dióxido de azufre  |
| <b>TA</b>             | Tecnologías alternativas (pirólisis/gasificación)          |
| <b>TMB</b>            | Tratamiento mecánico-biológico                             |
| <b>TRS</b>            | <b>Compuestos totales de azufre reducido</b>               |
| <b>VCO</b>            | Velocidad de carga orgánica                                |
| <b>WBCSD</b>          | Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sustentable |
| <b>WtE</b>            | Waste-to-Energy - Aprovechamiento energético de residuos   |

## 1. Introducción

### ***“Análisis del riesgo ambiental de las tecnologías de incineración de residuos urbanos”***

El objetivo de este **trabajo final integrador (TFI)** es brindar un panorama actualizado de la biomasa como fuente de energía, focalizando el estudio en el riesgo ambiental de la utilización de este tipo de tecnologías. Su marco conceptual, analizando su situación a nivel mundial, nacional y local, identificando las variadas discusiones actuales con respecto al uso y manejo de estos recursos y describiendo los principales vínculos de esta fuente energética con el cambio climático global y la sustentabilidad.

Centraremos el estudio en el análisis de los recursos de biomasa utilizados al presente, herramientas técnicas y metodológicas que nos orientarán en el estudio, caracterización y cuantificación de su potencial en las diferentes regiones, abocados siempre a la premisa de su riesgo ambiental.

Según el Diccionario de la Real Academia Española, existen dos definiciones de biomasa:

1. f. Biol. Materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen.
2. f. Biol. Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

La primera corresponde al campo de la biología, la ecología y otras ciencias naturales, mientras que la segunda es específica para el campo energético. Es vital tener en claro esta diferencia, para no generar confusiones. En este sentido, la biomasa con fines energéticos no necesariamente es materia viva, sino que puede ser también muerta.

En este trabajo, consideramos apropiado desde el punto de vista energético, seguir a Puigdevall y Galindo, 2007, referente a su enfoque sobre biomasa:

Se considera biomasa a todas aquellas sustancias orgánicas que fueron formadas a partir de los compuestos de carbono elaborados mediante el proceso de fotosíntesis, que pueden haber sido sometidas o no a diferentes procesos de transformación, y que son susceptibles de ser utilizadas por debajo de su tasa de renovación natural (en cantidad producida por unidad de tiempo).

No se incluyen por tanto en la definición a los combustibles fósiles que si bien tienen un primer origen en los compuestos formados en la fotosíntesis,

se usan muy por encima de su tasa de renovación (tardan millones de años en formarse).

Recapitulando entendemos también como **biomasa** a la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales (Figura 1).

Por lo tanto, los recursos biomásicos provendrán de fuentes muy diversas y heterogéneas.

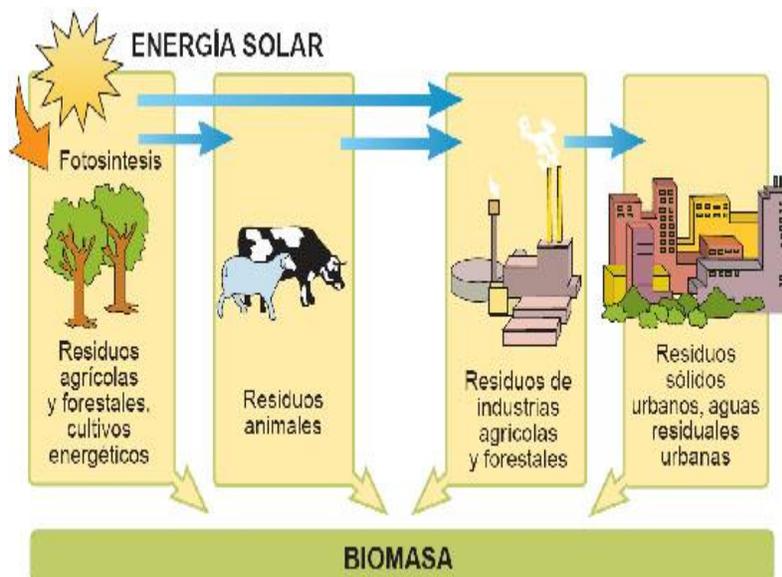


Figura 1: Tipos de biomasa (Fuente: <http://antiguo.minenergia.cl>)

A través de las técnicas de **gasificación** y **pirolisis** se pretenden transformar residuos sólidos en gas o combustibles de síntesis a través de la combustión, tener en cuenta que están regulados tanto en Estados Unidos como en la Unión Europea como **incineradores de residuos**.

Hay compañías que han estado experimentando con estas tecnologías por más de tres décadas. En este **TFI** se intenta considerar que, a partir de la información referente de las operaciones en instalaciones comerciales tentativas, existen muchos ejemplos de plantas que se vieron forzadas a cerrar debido a fallas técnicas y fracaso financiero.

Además, otros proyectos no han superado la fase de propuestas, luego de recaudar fondos significativos, debido a la oposición de la comunidad y la fiscalización del gobierno ante afirmaciones erróneas y muy optimistas.

Es decir la **incineración** se utiliza como tratamiento para una muy amplia gama de residuos, esta técnica en sí es en forma rigurosa sólo una parte de un complejo sistema de tratamiento de residuos que, en su conjunto, permite la gestión de la amplia gama de residuos que genera la sociedad.

El sector de la incineración ha experimentado un rápido desarrollo tecnológico durante los últimos 10 - 15 años. Gran parte de este cambio ha sido impulsado por legislaciones específicas para el sector y esto ha reducido en particular las emisiones a la atmósfera de las instalaciones individuales.

El desarrollo en cuanto a la tecnología empleada es constante, y actualmente el sector **desarrolla técnicas** que limitan los costos al tiempo que **mantienen** o **mejoran el rendimiento ambiental**.

El objetivo de la incineración de residuos, al igual que la mayoría de los tratamientos de residuos, es tratar los mismos con el fin de reducir su volumen y peligrosidad, capturando (y por lo tanto concentrando) o destruyendo las sustancias potencialmente nocivas. Los procesos de incineración también pueden ofrecer un medio que permita la recuperación del contenido energético, mineral o químico de los residuos.

Básicamente, la incineración de residuos es la **oxidación** de las **materias combustibles** contenidas en el residuo. Los residuos son por lo general materiales altamente heterogéneos, consistentes esencialmente en sustancias orgánicas, minerales, metales y agua. Durante la incineración, se crean gases de combustión que contienen la mayoría de la energía de combustión disponible en forma de calor. Las sustancias orgánicas de los residuos se queman al alcanzar la temperatura de ignición necesaria y entrar en contacto con oxígeno. El proceso de combustión en sí se produce en la fase gaseosa en fracciones de segundo y libera energía de forma simultánea. Cuando el poder calorífico del residuo y el suministro de oxígeno es suficiente, esto puede producir una reacción térmica en cadena y combustión auto sostenida, es decir, que no requiere la adición de otros combustibles.

El **cambio climático**, producido por el excesivo consumo de combustibles fósiles para la generación eléctrica, es la razón por la cual se trabaja para lograr un modelo energético sostenible se apuesta por una revolución energética capaz de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> para evitar un cambio climático peligroso.

Sin embargo, en los últimos diez años ha crecido el interés por los **combustibles derivados de los residuos (CDR)** entre la industria

cementera y la industria energética, principalmente por cuestiones económicas, entre las cuales cabe destacar el aumento del precio de los combustibles fósiles. Ha jugado un papel importante el elevado costo de los tratamientos finales (vertido e incineración).

***A modo de resumen final se concluye que los beneficios potenciales de la incineración de residuos son menores y más inciertos, y los riesgos son mucho mayores de lo que sus proponentes afirman. Los programas municipales que se basan en estrategias de prevención y separación de residuos, reciclaje y compostaje intensivo, y el rediseño de productos que no pueden volver a la cadena productiva, han demostrado tener éxito económico y técnico.***

**Palabras Claves:** Biomasa, CDR, rellenos sanitarios, incineración, gasificación, pirolisis, cenizas, cloro, corrosión, economía circular y cambio climático.

## **2. Objeto de estudio**

El objetivo del estudio es determinar el **riesgo ambiental** (emisiones e influencia en el cambio climático) en la tecnología de incineración de **RSU**.

A través del análisis y evaluación de las propuestas ingenieriles, considerando la introducción de la visión de la Mejor Técnica Disponible **MTD**.

Pretendo que sea el disparador de la compilación e integrador de los aspectos conceptuales fundamentales de la cursada.

El ámbito de aplicación es llevar a cabo, una **experiencia pedagógica** a desarrollar en la cátedra de Tecnología del Calor del cuarto nivel de la carrera de Ingeniería Mecánica UTN Facultad Regional Delta, trabajos de investigación en calderas de recuperación proceso kraft, a los efectos de la caracterización y análisis de los residuos gaseosos generados.

Es decir comprender la importancia y la aplicación de los generadores de vapor en los distintos procesos de incineración, con una visión enfocada en el impacto ambiental.

Como aspecto complementario pero no menor del mismo se pretende utilizar el mismo a los efectos de intensificar el desarrollo de los alumnos en el tema de las **competencias**.

### 3. Planteamiento del problema

Para la Organización Mundial de la Salud **OMS** el término «**residuos sólidos**» se refiere principalmente a los residuos domésticos, comunitarios e industriales no biodegradables. La expresión residuos sólidos incluye a los residuos sólidos generados en las viviendas, en los procesos de limpieza de los espacios públicos, en la actividad industrial, en la construcción y demolición de infraestructura de edificaciones públicas o privadas y en la carga y descarga de materiales. Igualmente, pueden incluirse aquellos residuos sólidos generados en las fábricas industriales, la chatarra de maquinaria y los residuos de hospitales, entre otros

Para elaborar este ítem deberíamos considerar lo siguiente: *¿Qué es el aprovechamiento energético de los residuos o **WtE**?*

**WtE** hace referencia a una familia de tecnologías de tratamiento de residuos para recuperar energía en la forma de calor, electricidad o combustibles alternos, tales como el biogás. El alcance del término '**Waste to Energy**' es sumamente amplio, y abarca un rango de tecnologías de diferente escala y complejidad.

Puede incluir la producción de gas para cocina en digestores domésticos a partir de residuos orgánicos, la recolección de gas metano de rellenos sanitarios, el tratamiento térmico de residuos en plantas de incineración del tamaño de una compañía de servicios, el coprocesamiento de Combustible Derivado de Residuos (**CDR**) en plantas cementeras o la gasificación.

Este trabajo aplica una definición más amplia de **WtE**, haciendo referencia a plantas a gran escala a nivel municipal (es decir, del tamaño de una compañía de servicios) usando tecnologías de incineración, coprocesamiento, digestión anaerobia, recolección de gas de relleno sanitario, y pirólisis / gasificación.

Estas cinco tecnologías aprovechan diferentes flujos de residuos y tienen funciones y características distintas, por lo que su aplicabilidad debe evaluarse en forma independiente con base en el contexto local y el flujo de residuos en cuestión.

#### 4. Descripción de las técnicas más comunes

Para trabajar este apartado deberíamos preguntarnos: *Dentro de las tecnologías de incineración. ¿Qué entiende por **gasificación** y por **pirolisis**?*

La **gasificación** y la **pirolisis** son procedimientos de alto consumo energético que intentan reducir el volumen de residuos convirtiéndolos en gas o combustibles de síntesis a través de la combustión. La gasificación de residuos está clasificada como una forma de incineración por la Unión Europea y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (según los artículos de ley EU Directive 2010/75EU Art 3.40; USA 40 CFR §60.51a, respectivamente) ya que incluye el tratamiento termal de los residuos y en la mayoría de los casos conduce a la combustión de los gases resultantes (ya sea in situ o como combustible distribuido).

En la “**gasificación**” se someten los residuos sólidos a altas temperaturas (generalmente sobre los 600°C) en un ambiente casi sin oxígeno. Los niveles de oxígeno O<sub>2</sub> se mantienen bajos para prevenir una combustión inmediata; en lugar de eso, la parte a base de carbono de los residuos sólidos se descompone en **gas de síntesis (syngas)** y un remanente sólido conocido como escoria, ceniza o residuo de carbón. Cabe señalar que las operaciones en condiciones casi sin oxígeno o sin oxígeno (publicitadas por muchos proveedores) son difíciles de llevar a cabo durante las operaciones a escala comercial. El syngas se compone principalmente de monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono, con contaminantes

Sin embargo, la propuesta de buscar una tecnología fija para el tratamiento de residuos mixtos presenta desafíos únicos y no es tan rentable como las estrategias de separación de residuos más exhaustivas.

Las tecnologías de gasificación, pirolisis y arco de plasma se aplican principalmente para flujos de residuos homogéneos. La naturaleza heterogénea de los residuos municipales no se ajusta bien a este tipo de tecnologías.

Algunas compañías proponen el uso de la pirolisis y la gasificación para transformar los residuos en combustibles que podrían quemarse en otras instalaciones, un procedimiento que no ha sido aplicado exitosamente a gran escala.

Esto requeriría etapas adicionales para limpiar los gases con el fin de que el combustible funcione, y estas etapas son de además, tiene el valor calorífico suficiente para ser quemado y transformado en energía, pero requiere sistemas avanzados de control de la contaminación (APC por sus siglas en inglés). A menudo, las instalaciones operativas no logran producir la energía suficiente para ser económicamente rentables. Los bioproductos derivados a partir de estos procedimientos comprenden emisiones atmosféricas, escorias (una forma de residuo sólido), cenizas volantes del equipo de control de contaminación del aire (que requiere manejo especial debido a su toxicidad) y residuos líquidos y/o aguas residuales.

En cambio la “**pirólisis**” es una propuesta similar, la cual aplica calor sin añadir oxígeno con el fin de generar combustibles y/o syngas (al igual que productos sólidos residuales) y requiere un flujo de residuos más homogéneo. Algunos proveedores ofrecen instalaciones más pequeñas para la generación de combustible, comparado con los proveedores de gasificación corriente (consulte “Propuesta residuos para combustible”).

Una propuesta de este tipo plantea preocupaciones adicionales acerca de las emisiones y la supervisión de éstas dado el uso intrínsecamente distribuido de tales combustibles.

Asimismo, las instalaciones de combustión más pequeñas no están equipadas generalmente con equipos de control o supervisión de la contaminación atmosférica que se requieren en las grandes instalaciones centralizadas.

Esto puede generar emisiones excesivas de Contaminantes Orgánicos Persistentes (**COP's**) tales como dioxinas y policlorobifenilos (**PCB's**); plomo, arsénico, mercurio y metales pesados; hidrocarburos aromáticos policíclicos, como los que se producen por la combustión de retardantes de llama y otros contaminantes sujetos a control reglamentario.

Cuando tales combustibles son distribuidos para diferentes usos en vehículos o calderas, por ejemplo, las emisiones fuera de las instalaciones pueden ser casi imposibles de monitorear.

La digestión anaeróbica y otros procesos biológicos similares son descritos a veces como “residuos para energía” porque estas tecnologías generan biogás a partir de materiales orgánicos como restos de comida o plantas. Al ser procesos biológicos, a diferencia de los procesos termales, se encuentran fuera del alcance de este documento.

La gasificación posee un largo historial de más de tres décadas de afirmaciones de los proveedores acerca de la conveniencia de la tecnología para el tratamiento de residuos.

Desafortunadamente, las plantas de gasificación tienen muy poca información operacional disponible.

Los oferentes de proyectos utilizan habitualmente datos proyectados o de referencia, pero la breve historia operacional de la mayoría de las instalaciones y la falta de monitoreo constante hacen que sea imposible llevar una verificación posterior de esas referencias o incluso los cálculos básicos de masa y balance energético.

En comparación con los procedimientos de gasificación, pocas instalaciones han intentado usar los procedimientos de pirólisis y arco plasma a una escala similar. Al igual que con la gasificación, existe poca información disponible. La información acerca de algunas instalaciones se incluye en los casos dentro de este documento.

La información existente muestra que docenas de proyectos han fracasado, debido a diferentes razones técnicas o financieras, como las que se discuten más adelante. Estos fracasos resaltan una incapacidad generalizada para cumplir con la generación de energía estimada, la generación de ingresos y los objetivos de emisiones, o simplemente una operación continua y constante.

Los aprendizajes primordiales que cabe destacar son que los beneficios de la gasificación de residuos son menores y más inciertos y los riesgos son muchos mayores de lo que

El “**arco de plasma**” aplica una temperatura más alta en los procedimientos de gasificación, y ocasionalmente en los de pirólisis. Este es un procedimiento de mayor energía que la gasificación y la pirólisis, además de que incrementa la barrera de los costos.

La incineración en sí es normalmente sólo una parte de un sistema de tratamiento de residuos complejo que, en su conjunto, permite la gestión de la amplia gama de residuos que genera la sociedad.

El objetivo de la incineración de residuos, al igual que la mayoría de los tratamientos de residuos, es tratar los residuos con el fin de reducir su volumen y peligrosidad, capturando (y por lo tanto concentrando) o destruyendo las sustancias potencialmente nocivas. Los procesos de incineración también pueden ofrecer un medio que permita la recuperación

del contenido energético, mineral o químico de los residuos. Los residuos son por lo general materiales altamente heterogéneos, consistentes esencialmente en sustancias orgánicas, minerales, metales y agua. En el presente trabajo solo nos dedicaremos a la incineración de RSU.

Una instalación industrial destinada a la incineración de **RSU** debe ser capaz de lograr los siguientes objetivos:

- Buen contacto entre el sólido y el aire para que pueda alcanzarse la temperatura de combustión y la transformación de los reactivos en los productos de reacción. Las velocidades de transferencia de materia y de transmisión de calor se efectúan a velocidad elevada cuando se opera con velocidades relativas del aire con respecto del sólido, altas.

- Distribución de tiempos de residencia apropiada para conseguir la transformación completa de los reactivos. Todos los sólidos deben estar en el horno un tiempo mayor o igual que el necesario para la conversión completa. Este tiempo depende de las variables del modelo cinético gas-sólido que describa el proceso. Cuando se logran rendimientos elevados se evita que salgan del horno compuestos inquemados tanto con la fase gas como con la fase sólida. De esta manera se consigue, además de aumentar el rendimiento energético del proceso, disminuir la emisión de contaminantes en el propio lugar donde se generan, con las ventajas que significa a la hora de depurar la corriente de gases a evacuar.

- Eliminación de cenizas y escorias para evitar que la fracción no combustible se acumule en el interior del horno.

Es preciso extraerlas continuamente, si es continuo, o antes de cada operación, si es por cargas. Cuando el horno contiene un material inerte, como arena, al eliminar la ceniza se elimina también una parte del inerte y una fracción de la alimentación que no ha estado suficiente tiempo para quemarse completamente.

- La distribución de temperaturas en el horno debe permitir que el sólido alimentado vaya alcanzando los sucesivos valores que se requieren para que transcurran los distintos procesos que experimentan los residuos en su combustión. Pero, además de los fenómenos deseados, se pueden producir otros que causan problemas de operación

Las tecnologías más comunes que pueden cumplir estos requisitos son: - Incineradores de parrilla - Hornos rotativos - Lechos fluidizados.

Las diferencias entre cada uno de estos procedimientos no siempre son claras, existen variaciones dentro de cada propuesta general y, a menudo,

los proveedores afirman que sus procedimientos tienen características únicas.

La visión enfocada en transitar hacia una economía circular tiene como propósito reemplazar la economía actualmente lineal de ‘tomar, usar y desechar’, con otra en la que los recursos circulan a valores altos, evitando o reduciendo la necesidad de recursos primarios y minimizando residuos, contaminantes y emisiones. Los motores principales de la economía circular son la creciente volatilidad de precios y las restricciones en el suministro de recursos primarios, las políticas ambientales, tales como la normatividad sobre responsabilidades del productor y, posiblemente una nueva cultura del consumidor. La Figura 2 muestra el principio de la economía circular desarrollado por la Fundación Ellen MacArthur.

La economía lineal atraviesa el centro, mientras que los círculos interiores representan las acciones que se pueden tomar para que los flujos de materiales sean más circulares con respecto a los residuos orgánicos e inorgánicos.

*El objetivo de un sistema moderno para la gestión de residuos no es la disposición o eliminación de productos residuales, sino ofrecer a la economía materias primas secundarias y energía generadas a partir de estos residuos.*

Ya en nuestros días, muchos países tienen la intención de desarrollar su estrategia nacional para la gestión integral de residuos, basadas en el concepto de las **3R**'s (como elemento integral de la economía circular), es decir “reducir, reutilizar y reciclar”:

### **1. Reducir:**

La principal prioridad en la gestión de residuos debe ser la reducción general del volumen de residuos sólidos, es decir residuos alimentarios, empaques, y el desperdicio innecesario de materias primas y de energía durante procesos de producción. Reducir los residuos también reduce el costo de la recolección y tratamiento de los mismos.

### **2. Reutilizar:**

La segunda prioridad debe ser la reutilización de materiales, es decir, la limpieza y reparación de un producto desechado para que se pueda volver a utilizar.

### 3. Reciclar:

La tercera prioridad en el concepto de las 3R's es el reciclado de materiales, es decir la recolección de residuos y su transformación en materias primas secundarias. El reciclado de plástico o de papel por ejemplo puede ahorrar más energía en la manufactura de productos que la energía que se puede producir en plantas de aprovechamiento energético de residuos a partir de dichos materiales.

Las diferentes tecnologías de aprovechamiento energético de residuos desempeñan diferentes papeles dentro de la **economía circular**, y se indican en la Figura 2.

Incluso con un reciclado intensivo, siempre habrá residuos remanentes que no tienen valor material o de mercado y que, en algunos casos, se clasifican como peligrosos. Estos residuos con cierto poder calorífico se pueden aprovechar para recuperar energía y sustituir el uso de combustibles fósiles.

Un tratamiento térmico, como la incineración o el coprocesamiento, que cumpla con los estándares de emisiones ambientales, también puede jugar un papel en la destrucción de sustancias orgánicas tóxicas y su eliminación del flujo circular de materiales.

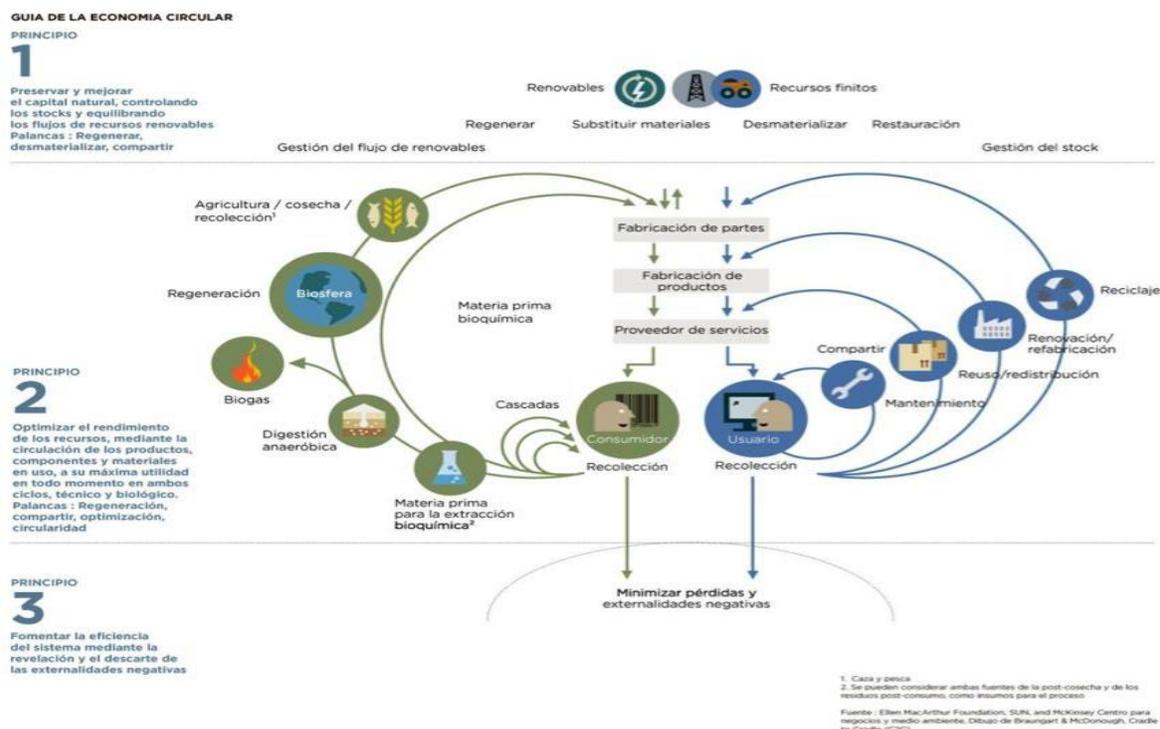


Figura 2: Los tres pilares de la Economía Circular. (Fuente: smartfertirrigation.eu)

Mientras el objetivo de la **Economía Circular** es mantener los materiales el mayor tiempo posible dentro del circuito, el de las plantas **WtE** es abastecerse en forma continua de residuos de buena calidad para incorporarlos en el ciclo de generación de energía y cumplir con los contratos de abastecimiento.

Tal como lo expresa la “**Encíclica Laudato SI**”: *“Todavía no se ha logrado adoptar un modelo circular de producción que asegure recursos para todos y para las generaciones futuras, y que supone limitar al máximo el uso de los recursos no renovables, moderar el consumo, maximizar la eficiencia del aprovechamiento, reutilizar y reciclar. Abordar esta cuestión sería un modo de contrarrestar la cultura del descarte, que termina afectando al planeta entero, pero observamos que los avances en este sentido son todavía muy escasos”*.

Algunas materias valiosas, como los metales, se pueden recuperar de las escorias o cenizas remanentes del proceso de incineración; sin embargo, el resto debe ser tratado en forma independiente y disponerse en un relleno sanitario seguro. Si la fracción orgánica se puede separar en forma eficiente de la fracción inorgánica, la digestión anaerobia también puede desempeñar un papel importante en la recuperación de biogás y composta en el ciclo biológico. La recolección de gases de un relleno sanitario permite la mitigación de metano liberado de los residuos orgánicos enviados a dichos rellenos sanitarios.

*Los proyectos de aprovechamiento energético de residuos no deben competir con las medidas para su reducción, ni con las medidas de reutilización eficientes en términos de costo y el reciclado de materiales. El aprovechamiento energético de residuos es una tecnología complementaria para el tratamiento de fracciones de RSU remanentes no reciclables.*

La recuperación energética de RSU desempeña un papel en la economía circular al utilizarse para fracciones de residuos peligrosos y no reciclables, respetando los estándares ambientales y considerando los aspectos sociales. No obstante, su integración en países en vías de desarrollo y emergentes sigue en las etapas iniciales. Algunas compañías ofrecen opciones responsables, pero muchos debates sobre el tema pueden estar sesgados y ser poco transparentes.

Es importante ser cautos respecto de las **quimeras** (*ficciones, fantasías, mitos*) más comunes que persisten acerca del aprovechamiento energético

de residuos, que las empresas sin experiencia buscando aprovecharse de los municipios pueden usar como recurso:

**1:** *“El aprovechamiento energético de residuos es una solución fácil para deshacerse de los problemas de los residuos de una ciudad”*

La situación es mucho más compleja, y el aprovechamiento energético de residuos requiere planeación, construcción y operación profesionales. Desafortunadamente, hay varias compañías en el mercado que no cuentan con experiencia en las condiciones de los países en vías de desarrollo y emergentes. Los responsables de la toma de decisiones deben tener conciencia de que su objetivo es, en primer lugar, “vender” su producto y no resolver el problema local.

**2:** *“Una planta de aprovechamiento energético de residuos se financia sola y únicamente mediante la venta de la energía que recupera”*

En Europa, donde el poder calorífico de los residuos y los precios de energía son más altos, los ingresos de la venta no subsidiada de energía (en la forma de calor y electricidad) pueden llegar a cubrir los costos operativos, pero nunca la inversión total y los costos de capital.

**3:** *“Una planta de aprovechamiento energético de residuos en operación es capaz de cubrir una gran fracción de la demanda de energía de una ciudad”*

En realidad, la energía de los residuos domésticos sólo podrá contribuir con una pequeña fracción a cubrir la demanda de energía total de una ciudad (~5%). El uso del calor generado es la aplicación más eficiente en Europa, pero rara vez se utiliza en países en vías en desarrollo.

**4:** *“La basura se puede convertir en oro; incluso los residuos mezclados se pueden vender con ganancia para la recuperación de energía y materiales”*

En realidad, el aprovechamiento energético de residuos no es un modelo de negocios que genera ingresos que cubren todos los costos. Los ingresos de la venta de energía ayudan a cubrir parte del costo general del tratamiento térmico, pero se requiere el pago de tarifas adicionales y otras formas de ingresos para cubrir la totalidad de costos.

En todos los países, la gestión de residuos como un todo representa costos y no se puede considerar un negocio rentable que pudiera depender exclusivamente de la venta de energía, de Combustibles Derivados de Residuos (CDR) y materiales de reciclado a los precios actuales de dichos productos.

**5: “Compañías internacionales calificadas y con experiencia están haciendo fila para invertir y operar plantas de aprovechamiento energético de residuos en países en vías de desarrollo y emergentes a riesgo propio”**

Esto es correcto sólo en parte ya que las compañías internacionales con experiencia actualmente se muestran renuentes a invertir en proyectos de aprovechamiento energético de residuos en países en vías de desarrollo y emergentes.

Los riesgos legales, financieros y reputaciones son altos, y cualquier proyecto del sector privado tiene que ser bancable.

Estos mitos se mantienen vivos y pueden llegar a obstaculizar los debates informados. La presente guía busca ofrecer una orientación integral a los responsables de la toma de decisiones para abordar en forma realista estos mitos.

Mediante la recuperación de material y energía, el coprocesamiento contribuye a la reducción de los impactos ambientales generales de la producción de cemento, un proceso intensivo en términos de consumo de recursos y que genera diversas emisiones al aire que deben ser monitoreadas y reducidas más allá de los límites legalmente prescritos mediante técnicas apropiadas. Las emisiones potenciales de los hornos cementeros incluyen polvo, óxidos de nitrógeno (NOx) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) así como dioxinas y furanos, óxidos de carbono (CO, CO<sub>2</sub>), compuestos orgánicos volátiles, ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF) y metales pesados.

Para garantizar el coprocesamiento ambientalmente razonable de CDR en hornos cementeros, los operadores de plantas cementeras deben adherirse a ciertos principios, como los de la Convención de Basilea (2012), el WBCSD (2014), o GTZ/ Holcim (2006). Al utilizar CDR, las emisiones deben ser iguales o menores que sin el uso de CDR.

Para este fin, el uso de tecnologías de punta y procedimientos como la alimentación directa del CDR a las zonas de alta temperatura en el horno es obligatorio.

El diseño de plantas cementeras modernas a menudo ya cumplen con las normas internacionales. Cuando esto ya está asegurado, los requisitos para mejorar el control de emisiones para coprocesamiento son menores. Además, la selección de residuos idóneos, su transporte y almacenamiento apropiados, y su preparación para convertirlos en CDR es crucial para minimizar los impactos ambientales. Los productos finales de cemento

deben someterse a pruebas de fugas potenciales de metales pesados antes de su uso en edificios, carreteras u otras construcciones.

Para quemar las basuras municipales se utilizan dos técnicas, que se distinguen por el grado de preparación del combustible:

**Combustión en masa.** Se utiliza la basura sin preparación alguna, tal como se recibe; sólo se retiran de la misma los artículos que son demasiado grandes o incombustibles.

Los vehículos de recogida de basuras las descargan y vuelcan directamente en los fosos de almacenamiento, desde donde se transportan hasta la tolva de carga de la parrilla del hogar mecánico, Figura 3. La fracción combustible de las basuras se quema y la no combustible pasa a través del hogar mecánico cayendo al foso de ceniza, de donde se recupera para llevarla a su vertido final.

**Combustión de basuras preparadas (RDF).** Emplea como combustible la basura preparada (RDF), a partir de la basura tal como se recibe; las operaciones a realizar son:

- »» Separación y clasificación
- »» Recuperación para lograr productos vendibles o reciclables Figura 4.
- »» El material restante se lleva a los alimentadores de la caldera y al emparrillado sinfín de la misma

El combustible derivado de basuras (RDF) se quema parcialmente en: **suspensión** o en **masa** sobre la parrilla del hogar mecánico; en suspensión se pueden quemar las partículas finamente trituradas, para complementar los fuegos convencionales en las grandes calderas utilizadas para la generación de electricidad.

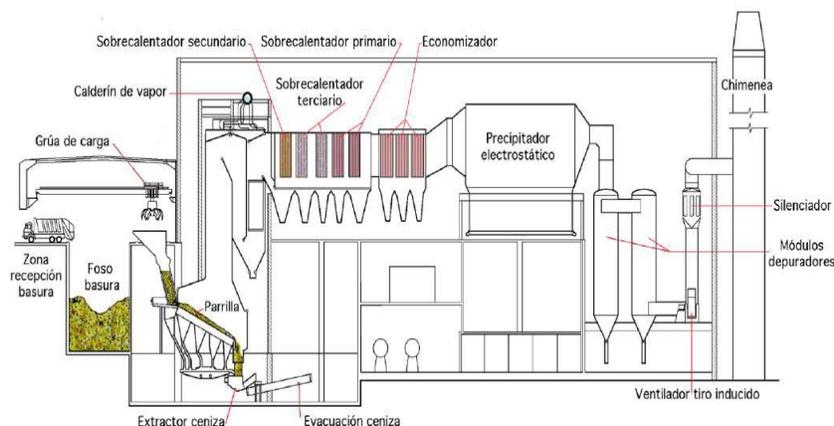
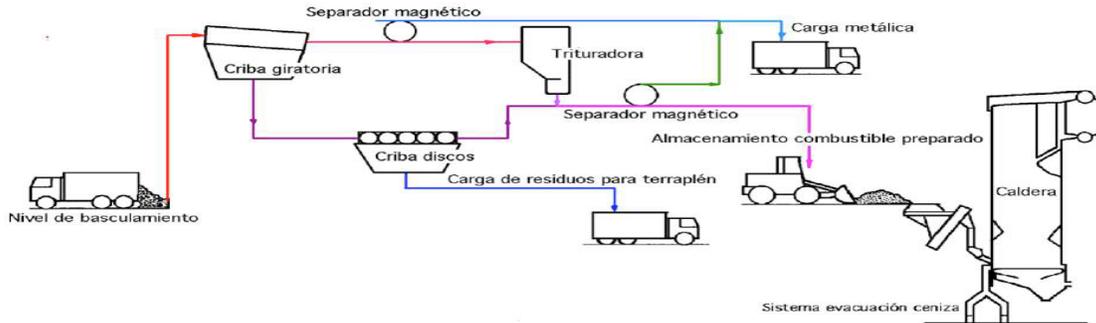


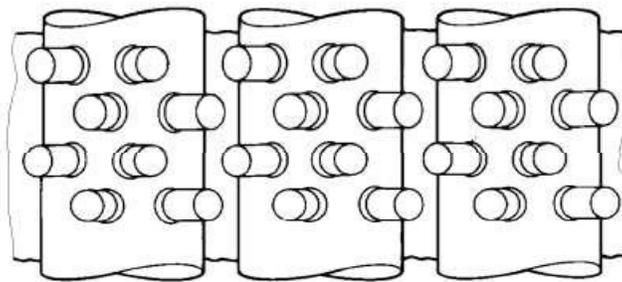
Figura 3 - Esquema de caldera de combustión en masa europea B&W (Fuente: pfernandezdiez.es)

A continuación entendemos importante describir en profundidad cada tipo de calderas para lo cual recurrimos a la bibliografía básica utilizada en la asignatura del cuarto nivel de Ingeniería Mecánica “Tecnología del Calor” de la cual soy Profesor Asociado (por concurso de antecedentes / oposición).

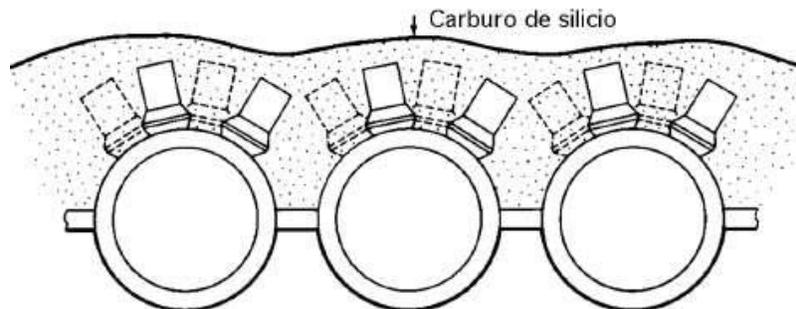


**Figura 4** - Esquema de preparación de combustible derivado de basura (RDF) (Fuente: pfernandezdiez.es)

**Unidades de Combustión en Masa.** Todas las calderas para residuos con combustión en masa, incorporan algún tipo de - protuberancia en forma de clavos - refractario de carburo de silicio (CSi), para proteger las paredes membrana del hogar inferior, Figura 5.



**Fig. 5 a** - Protuberancias y refractario del hogar inferior de una unidad quemando en masa (Fuente: pfernandezdiez.es)



**Fig. 5 b** - Protuberancias y refractario del hogar inferior de una unidad quemando en masa (Fuente: pfernandezdiez.es)

El material refractario debe tener una conductividad térmica elevada, que minimice la reducción de la efectividad de la superficie refrigerada por agua protegida por el carburo.

Existen zonas (bordes de parrillas) en las que su resistencia puede disminuir debido al desgaste por erosión, originada por el rozamiento del residuo combustible ceniza, cuando se desplazan con la parrilla hacia la descarga de ceniza. En estas zonas se utilizan materiales de CSi, que ofrecen una buena resistencia a la erosión, aunque tienen menor conductividad térmica.

Una alternativa mejor para proteger los bordes de la parrilla, consiste en la utilización de bloques de refractario, rígidamente unidos a las paredes del hogar, en todo lo alto de la boca de la tolva de carga, que es del orden de 4 ft (1,2 m), en la pared frontal del hogar, llegando a 1 ft (0,3 m) de altura en el lado de descarga de la ceniza, Fig. 6.

La disposición, longitud y diámetro de los clavos se escogen con cuidado, con vistas a la posibilidad de mantener el refractario en su sitio y maximizar la transferencia de calor a lo largo de los clavos, hacia los tubos de las paredes del hogar, con el fin de:

»» Facilitar la máxima refrigeración, para mantener la temperatura del refractario tan baja como sea posible, lo que influye en la vida del refractario, en el ensuciamiento de las paredes del hogar y en los costes de mantenimiento.

»» Tener una menor superficie termo intercambiadora en la parte superior del hogar, para lograr la temperatura deseada en los humos que salen del hogar, como consecuencia de la mayor cantidad de calor retirada en la parte inferior del mismo.

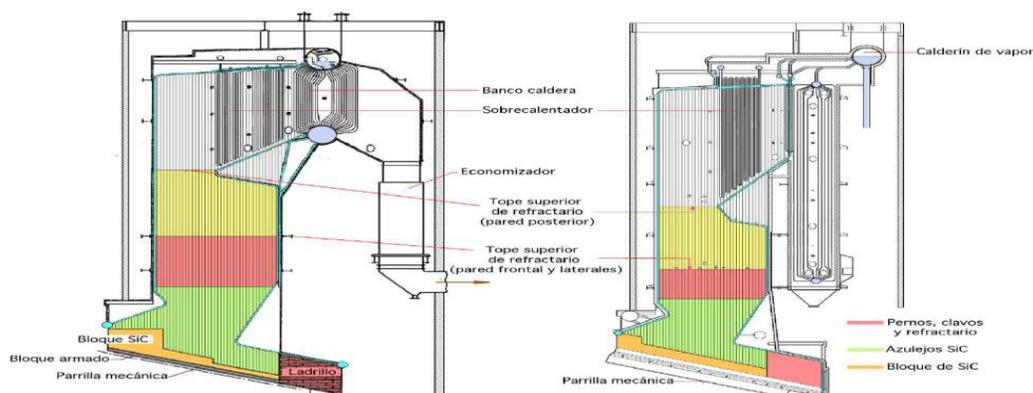


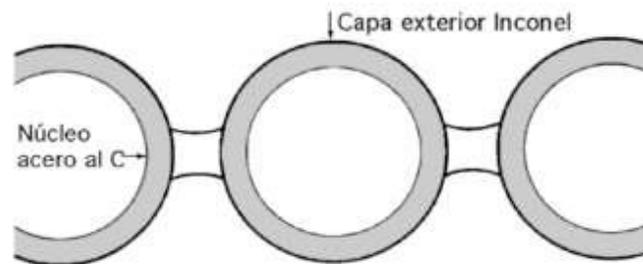
Fig. 6 - Ubicación y tipo de refractario en unidades que queman masa (Fuente: pfernandezdiez.es)

**Unidades que queman combustibles derivados de residuos.** Con anterioridad a 1980, las calderas que quemaban combustibles derivados de residuos (**RDF**) se instalaban con tubos desnudos de acero al C en la parte inferior del hogar y sin protección alguna, sin tener en cuenta la corrosión en el hogar inferior. Las primeras unidades, que operaban a baja presión y temperatura del vapor, no experimentaron problemas de corrosión. Cuando se aumentó la presión y temperatura en las unidades, la corrosión se incrementó y se hizo necesario proteger el hogar inferior.

En las unidades de combustión de (**RDF**) se ensayaron los mismos diseños de clavos y refractario, que se utilizaron en las unidades de combustión en masa, lo que resolvió un problema y planteó otro nuevo. En este proceso de combustión, un alto porcentaje de la combustión se desarrolla en suspensión, con altas temperaturas de las llamas, en la parte baja del hogar.

Cuando se aplican clavos y refractario, los tubos de la parte inferior del hogar están aislados, de modo que la: a. transferencia de calor es menor b. temperatura de los gases de combustión en el hogar inferior es mayor, lo que da lugar a una escorificación sobre la superficie del refractario que cubre las paredes del hogar inferior.

Para proteger los tubos desnudos de acero al C en la parte baja del hogar, de la corrosión de los cloruros encontrados en las calderas que queman basuras, en lugar de proceder al aislamiento térmico de estos tubos, se les recubre con una capa soldada de material Inconel, que se ha mostrado efectiva al minimizar la corrosión (1980).



*Fig XXVIII.8.- Tubo bimetálico*

**Fig. 7 - Tubo bimetálico** (Fuente: pfernandezdiez.es)

En 1989 se toma la decisión de proteger los tubos con Inconel, durante el proceso de construcción de unidades; tubos bimetálicos Figura 7, formados constituidos por un tubo interior de acero al C y un tubo exterior de Inconel, permitían alcanzar una protección más uniforme, que la obtenida por soldadura, de una capa superpuesta.

En la actualidad, en las calderas que queman combustibles derivados de basuras (**RDF**), el tubo bimetálico constituye el estándar industrial para la protección contra la corrosión en la parte inferior del hogar.

A continuación es importante asociar la variable económica, para lo cual expondremos un cálculo de la energía generada por la incineración de **RSU**. En Europa en 2008 se incineraron 58,5 millones de Toneladas de RSU que generaron 23,4 billones de KWH de electricidad y 58.5 billones de KWh. en calorías que se suministraron a los hogares, centros comerciales, oficinas, etc. como calefacción.

En energía eléctrica esto significa que se producen 400 KWh por tonelada de RSU quemada.

Es decir que una ciudad de 1.000.000 habitantes que genera aproximadamente  $1000 \text{ t día}^{-1}$  de RSU (con 12 a 15 % de residuos plásticos) y destina a la combustión con generación de energía el 30 % del RSU generado ( $300 \text{ t día}^{-1}$ ) genera aproximadamente 5,0 MWh de energía.

Considerando un consumo promedio de 200 KWh por hogar y por mes la energía generada alcanza para abastecer 18.000 hogares. Si consideramos 4 personas por hogar promedio tenemos 72.000 personas que es el 7,2 % de la población. Considerando  $2100 \text{ Kcal Kg}^{-1}$  de RSU sin plástico y que se aporta 7 % de residuos plásticos al RSU (50 % del total de plásticos) los residuos plásticos aportan 28 % de la energía siendo solo el 7% en peso (Se toma como promedio  $8300 \text{ Kcal Kg}^{-1}$  el PCI del plástico).

Ejemplo de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires **CABA**:

La Ciudad Autónoma de Buenos Aires genera del orden de  $5 \cdot 10^3 \text{ t día}^{-1}$  de RSU considerando los provenientes de: »» Domiciliarios »» Barrido »» Otros (Áridos, escombros, árboles caídos, poda, grandes bultos como electrodomésticos, etc.)

Los residuos domiciliarios fueron en 2008 de  $2,1 \cdot 10^3 \text{ t día}^{-1}$ .

Haciendo la hipótesis que se destinen a la combustión con recuperación de energía el 30 % de los mismos se tienen  $630 \text{ t día}^{-1}$ .

Considerando como promedio  $400 \text{ KWH t}^{-1}$  de RSU se tiene una potencia de 10.5 MW neta para la red de distribución.

Resumiendo para un consumo estimado de  $200 \text{ KWH mes}^{-1}$  por cada hogar se pueden abastecer **37.800** hogares que equivalen a 151.200 personas que es aproximadamente el **6** % de la población de la ciudad.

## Impacto Ambiental de las emisiones a la atmósfera

Cuando se compara las emisiones a la atmósfera de las plantas de Recuperación Energética (**WtE**) con otros combustibles tales como el Carbón, Fuel Oil y Gas natural la conclusión es que las plantas WtE tienen menos impacto ambiental como se muestra en la tabla siguiente (Tabla 1):

### Emisiones a la atmosfera de plantas WtE comparadas con plantas que usan combustibles fósiles (Kg MWh<sup>-1</sup>)

| Tipo de combustible | Dióxido de Carbono<br>CO <sub>2</sub> | Dióxido de Azufre<br>SO <sub>2</sub> | Óxidos de Nitrógeno<br>NO <sub>x</sub> |
|---------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Carbón              | 1020                                  | 5,9                                  | 2,7                                    |
| Petróleo            | 758                                   | 5,4                                  | 1,8                                    |
| Gas Natural         | 515                                   | 4,5 10 <sup>-2</sup>                 | 7,7 10 <sup>-1</sup>                   |
| Waste to Energy     | <b>380</b>                            | <b>3,6 10<sup>-1</sup></b>           | <b>2,45</b>                            |

Tabla 1

A modo de conclusiones, se observan las emisiones típicas a la atmósfera medidas como gases contaminantes por cada MW hora producida por una planta generadora de energía.

Si bien todas las plantas generan contaminantes atmosféricos las plantas **WtE** son las que como balance general contaminan menos comparadas con las plantas de combustibles fósiles.

A estos valores son aún mayores si les debe suma las emisiones ahorradas por la recuperación de los metales tales como hojalata y aluminio que son reciclados y las emisiones de metano que se evitan por la fermentación anaeróbica en los rellenos sanitarios.

Cabe señalar que los **residuos plásticos** juegan un papel importante en la combustión porque aportan gran parte del calor de combustión que permite un funcionamiento adecuado de la central térmica.

El poder calorífico inferior (**PCI**) promedio en el año se estima en un valor mínimo de 1672 Kcal Kg<sup>-1</sup> (7 MJ Kg<sup>-1</sup>). Los residuos plásticos contribuyen a lograr este promedio ya que tienen un poder calorífico muy superior al de la basura orgánica y tienen un rol fundamental en mantener la combustión en el horno de combustión

Dependiendo de la calidad de los **RSU** (Residuos Sólidos Urbanos) recibidos se hace necesario realizar una selección previa a la combustión. Dicha selección puede ser manual, mecánica o automática ó combinación de ellas. Antes de la combustión se separan los materiales reciclables tales

como metales (aluminio y hojalata), papel y cartón, grandes bultos tales como restos de electrodomésticos, plásticos limpios, etc.

### Ventajas del sistema **WtE**

»» Reduce la cantidad de residuos que van a los rellenos sanitarios en dos aspectos en el volumen que ocupan y en evitar la generación de gas metano  $\text{CH}_4$  (biodegradación anaeróbica) que tiene 21 veces más efecto invernadero que el dióxido de carbono.

»» Disminuye la dependencia de los combustibles fósiles.

»» Se reciclan los metales (hojalata y aluminio) disminuyendo las operaciones mineras con la consecuente disminución de contaminaciones y emisión de  $\text{CO}_2$ .

»» Reduce el tráfico de camiones con RSU para llevarlos a los rellenos sanitarios que en muchos casos, y cada vez más, se encuentran lejos de las ciudades.

»» Permite la valorización de residuos plásticos sucios y de estructuras complejas como envases laminados de diferentes tipos de plásticos que no pueden ser reciclados mecánicamente.

Dado que el enfoque de la propuesta de intervención es reutilización de residuos plásticos, a modo de ejemplo se detalla la producción de energía de los plásticos

A través de un **sencillo cálculo** se muestra en la práctica cual es el impacto de la combustión de los plásticos en la producción de energía. Se da el ejemplo de la combustión de un pote de yogurt que puede mantener encendida una lámpara de 40 watts durante una hora.

La energía que se recupera de la combustión de un envase plástico es equivalente a la energía consumida por una lámpara incandescente de 40 watts durante una hora

Peso promedio pote de yogurt  $200 \text{ cm}^3 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$



Poder Calorífico (PS) =  $8400 \text{ Kcal kg}^{-1}$

$8,4 \cdot 10^3 \text{ Kcal kg}^{-1} \times 8 \cdot 10^{-3} \text{ kg} = 67 \text{ Kcal}$

$67 \text{ Kcal} = 78 \text{ watts h}^{-1}$

Eficiencia 50 % = **40** watts  $\text{h}^{-1}$

**Pote de Plástico (PS) = Lámpara 40 Watt encendida una hora**

## Utilización de los distintos tipos de plásticos

Los distintos plásticos que se encuentran en los **RSU** tienen distinto comportamiento en el proceso de pirólisis <sup>(1)</sup> como se muestra en la Tabla 2.

### Residuos Plásticos a Combustibles

| Plástico                               | Densidad      | Adaptabilidad al sistema de pirólisis <sup>(1)</sup> |
|--|---------------|--|
| Polietileno ( <b>PE</b> )              | 0,919 - 0,960 | Muy buena  |
| Polipropileno ( <b>PP</b> )            | 0,900         | Muy buena  |
| Poliestireno ( <b>PS</b> )             | 1,050         | Muy buena  |
| Copolimero <b>ABS</b>                  | 1,03 - 1,07   | Buena. Requiere monitoreo de gases remanentes        |
| Policloruro de vinilo ( <b>PVC</b> )   | 1,350         | No adecuado  |
| Poliuretano ( <b>PU</b> )              | 1,200         | Buena. La recuperación de aceite es limitada         |
| Polietileno tereftalato ( <b>PET</b> ) | 1,37 - 1,45   | Muy limitado. Recomendable 1 % Máximo 5 %            |

**Tabla 2**

<sup>(1)</sup> La **pirólisis** es un proceso de termo degradación en ausencia de oxígeno. Los residuos plásticos son continuamente tratados en una cámara cilíndrica y los gases pirolíticos son condensados en un sistema condensador especialmente diseñado para generar un destilado de hidrocarburo compuesto por hidrocarburos alifáticos de cadena abierta y ramificada, alifáticos cíclico e hidrocarburos aromáticos. La mezcla resultante es esencialmente equivalente al destilado de petróleo.

## 5. Justificación

El siglo XXI será considerado como el siglo de las ciudades. La población urbana del mundo ha crecido rápidamente desde 1950, aumentando de 746 millones a 3.9 mil millones de personas en el 2014. De acuerdo con datos de la ONU, se espera que esta cifra aumente a 9.7 mil millones para el 2050, con casi un 90 por ciento de incremento en centros urbanos de África y Asia.

Ya en nuestros días, el volumen global de residuos sólidos urbanos se estima en 2 mil millones de toneladas por año. A diferencia de las tendencias mundiales de población y urbanización, la ONU no cuenta con pronósticos sobre la generación de residuos per cápita en el futuro. No obstante, existe un entendimiento común de que los volúmenes de residuos incrementarán en forma sustancial. Los motores detrás de dicho incremento son el consumo de bienes entre la población urbana creciente, cambios en estilos de vida, y la creciente riqueza de la clase media en ascenso.

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía, las tasas de generación de residuos se duplicarán en los próximos veinte años en países de bajos ingresos. Independientemente de la precisión de estos pronósticos, estos enormes volúmenes de residuos representarán un tremendo reto para

la mayoría de las autoridades urbanas locales que desde ahora ya están batallando con el manejo de volúmenes de residuos.

*Los **rellenos sanitarios** son una solución **intermedia** o **transicional**, aunque necesaria, para el manejo de residuos. Sin embargo, no son el objetivo final de una gestión de residuos sustentable. Los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos deberán seguir priorizando el reciclado de materiales.*

Hasta la fecha, cerca del 70% de los **RSU** acaba en rellenos sanitarios o en vertederos no controlados, a menudo contaminando aguas superficiales, subterráneas o suelos, y emitiendo gases de efecto invernadero.

El desecho de residuos cerca de las zonas costeras y a lo largo de ríos representa un riesgo de contaminación marina con basura originada en la tierra. Los rellenos sanitarios ya no se consideran una tecnología de punta.

A pesar de la existencia de excelentes ejemplos de gestión de rellenos sanitarios (RS) con una reducción sustancial de los impactos negativos sobre el medio ambiente, la búsqueda de nuevos sitios para rellenos sanitarios a menudo va de la mano con protestas públicas, y rara vez se dispone de espacio para generar nuevos sitios en la cercanía de áreas metropolitanas o centros urbanos; debido a la escasez de terrenos, de conflictos en el uso de suelo, y del rápido aumento de los precios de los terrenos.

El tratamiento apropiado y la disposición de residuos siguen representando un importante reto, a menudo abrumador para numerosos municipios. La necesidad de incentivos para reducir la generación de residuos e incrementar el reciclado es indispensable.

La separación de **RSU** en su punto de origen, su recolección, transporte, tratamiento y disposición apropiados se han convertido en un objetivo legal de muchos países en vías de desarrollo y emergentes. No obstante, y a pesar del buen avance en las últimas décadas en el reciclado de materiales “clásicos” como el papel, metales, vidrio o plástico, los niveles actuales de reciclado aún son insuficientes.

*Para residuos específicos no reciclables, el aprovechamiento energético de residuos podría ser una alternativa viable para la gestión de los crecientes volúmenes de residuos en los próximos años si se cumple con los estándares ambientales y si se consideran los aspectos sociales con atención.*

## **Aprovechamiento energético de residuos: una alternativa para los municipios**

*Atender el tema del aprovechamiento energético de residuos significa alcanzar un nuevo nivel de complejidad en una situación de gestión de residuos ya de por sí desafiante.*

El aumento de la preocupación con respecto a los recursos naturales limitados, la contribución de la gestión incorrecta de residuos al calentamiento global y la escasez de fuentes de generación eléctrica han desencadenado debates generales sobre los residuos como una fuente de recurso, y específicamente para el aprovechamiento energético de residuos. Los responsables de la toma de decisiones a nivel nacional y local en países de vías de desarrollo y emergentes, podrán verse tentados por proveedores de tecnologías que prometen que las plantas de aprovechamiento energético de residuos resolverán sus problemas de disposición final de desechos, crearán oportunidades de negocios lucrativos y contribuirán en forma positiva al suministro de energía. Como tal, los residuos parecen ser un sustrato ideal para la recuperación energética. Hasta ahora, sin embargo, sólo un número limitado de proyectos implementados en países en vías de desarrollo y emergentes ha sido operado con éxito en el largo plazo.

Algunas experiencias positivas hasta la fecha están relacionadas con el coprocesamiento con tecnología de punta en hornos cementeros y la recolección de gases de relleno sanitario. No obstante, actualmente casi no existen digestores anaeróbicos alimentados con RSU orgánicos separados en operaciones exitosas a gran escala en países en vías de desarrollo, ni tampoco hay más de un número reducido de incineradores de basura operando en forma continua en países en vías de desarrollo en África o Asia. Las tecnologías alternativas como la pirólisis y la gasificación nunca pasaron más allá de la escala piloto (ni siquiera en países industrializados) para fracciones de **RSU** mixtas.

Las condiciones marco en la mayoría de los países en vías de desarrollo y emergentes son en esencia diferentes de los que han visto el surgimiento y aplicación exitosa de proyectos de aprovechamiento energético de residuos en Europa, Norteamérica, Japón y China, donde las plantas de aprovechamiento energético de residuos del tamaño de compañías de servicios son cada vez más comunes.

Una simple transferencia de tecnología a menudo no tiene éxito porque no satisface las condiciones de países en vías de desarrollo y emergentes, en

especial en términos de requisitos financieros, la composición de los materiales y las capacidades locales.

### **Aspectos medioambientales claves**

Los residuos y su gestión son un aspecto ambiental muy significativo y relevante. El tratamiento térmico de residuos puede, por tanto, verse como una respuesta a las amenazas medioambientales planteadas por corrientes de residuos mal gestionadas o sin gestionar. El objetivo del tratamiento térmico es proporcionar una reducción global de impacto ambiental que, de otro modo, podría derivarse de los residuos. No obstante, en el curso del funcionamiento de instalaciones de incineración se generan emisiones y consumos cuya existencia y magnitud se ve influenciada por el diseño y el funcionamiento de la instalación.

Los posibles impactos de las instalaciones de incineración de residuos en sí se engloban en las siguientes categorías:

- »» Emisiones globales del proceso a la atmósfera y al agua (incluido olor).
- »» Producción global de residuos del proceso.
- »» Ruido y vibración del proceso.
- »» Consumo y producción de energía.
- »» Consumo de materias primas (reactivos).
- »» Emisiones fugitivas –principalmente del almacenamiento de residuos.
- »» Reducción de los riesgos de almacenamiento/manejo/proceso de residuos peligrosos.

Otros impactos que pueden tener un impacto significativo sobre toda la cadena de gestión de residuos se derivan de las siguientes operaciones:

- »» Transporte de los residuos entrantes y de los residuos de salida;
- »» Pre tratamiento amplio de residuos (ej.: preparación de combustibles derivados de residuos).

La aplicación y entrada en vigor de modernas normativas sobre emisiones, así como el uso de modernas tecnologías de control de la contaminación, han reducido las emisiones a la atmósfera a niveles en los cuales los riesgos contaminantes de las incineradoras de residuos se consideran por lo general muy bajos.

El uso continuado y eficaz de dichas técnicas para controlar las emisiones a la atmósfera representa un aspecto medioambiental clave.

Además de su papel para asegurar un tratamiento eficaz de residuos sin gestionar, potencialmente contaminantes, muchas instalaciones de incineración de residuos tienen un papel particular como procesos de recuperación de energía a partir de residuos. En los lugares donde se han aplicado políticas para aumentar la capacidad de las instalaciones (generalmente municipales) de incineración de residuos para valorizar los residuos, esto aumenta la explotación de esta contribución medioambiental positiva. Por lo tanto, una oportunidad medioambiental significativa para el sector es incrementar su potencial como proveedor de energía.

La recuperación del valor energético del residuo es un aspecto medioambiental clave para el sector, presentando un área en la que el sector puede hacer una considerable contribución positiva. Varias de las mejores técnicas disponibles o **MTD** cubren este aspecto, ocupándose de:

- »» Técnicas específicas que se consideran **MTD**.
- »» Las eficiencias de transferencia de calor esperadas en calderas.
- »» El uso de cogeneración, calefacción centralizada, suministro de vapor industrial y producción de electricidad.
- »» Las eficiencias de recuperación que cabe esperar.

Dado que la cogeneración y el suministro de vapor/calor ofrecen generalmente la mejor oportunidad para aumentar los índices de recuperación de energía, las políticas que afectan a la disponibilidad de clientes adecuados para vapor/calor juegan normalmente un papel bastante más importante en la determinación de la eficacia alcanzable en una instalación que los detalles sobre su diseño. Por motivos principalmente estratégicos y económicos, la producción y suministro de electricidad suele ser la opción de recuperación de energía escogida en instalaciones individuales. Las opciones de cogeneración, calefacción centralizada y suministro de vapor industrial sólo están bien explotadas en unos pocos Estados Miembros europeos –generalmente los que tienen los precios energéticos más elevados o han adoptado políticas particulares.

El suministro de energía para el funcionamiento de sistemas de refrigeración y plantas de desalinización es algo que se hace, aunque en general está mal explotado –se trata de una opción que puede ser de particular interés en zonas con climas más cálidos, y en general amplía las opciones para el suministro de energía derivada de residuos.

*Los proyectos de aprovechamiento energético de residuos son costosos y constituyen un riesgo financiero sustancial para los municipios. La evaluación independiente de costos y el profundo entendimiento de las implicaciones financieras son cruciales para la toma de decisiones.*

Los proyectos de aprovechamiento energético de residuos requieren altas inversiones no sólo para el proceso de tratamiento mismo sino también para la mitigación de los riesgos operativos (accidentes, incendios, etc.).

Los costos de operación y mantenimiento (**OyM**) de las plantas de aprovechamiento energético de residuos son considerablemente mayores que los costos de rellenos sanitarios.

El financiamiento asegurado y permanente es clave para cualquier sistema de gestión de **RSU** funcional.

El municipio debe asegurar que los requerimientos financieros se podrán satisfacer.

Como esto no siempre es posible mediante las tarifas pagadas por los residuos, se deberán considerar otras alternativas de financiamiento adicionales. Las siguientes opciones son ejemplos de fuentes de generación de ingresos:

- »» Cobro directo de cuotas por residuos a los ciudadano.
- »» Financiamiento cruzado de servicios de **RSU** a través de otras cuotas o impuestos locales.
- »» Régimen de tarifas cuando los residuos se entregan en una planta.
- »» Ingresos de la venta de material reciclado y energía recuperada (electricidad, calor/vapor).
- »» Subsidios locales o nacionales.
- »» Ingresos de fondos de carbono nacionales o internacionales (ej. Green Cimate Fund).
- »» Reembolsos fiscales y la aplicación de tarifas de alimentación especiales por la electricidad producida a partir de fuentes no convencionales, como materiales de residuos.

En especial las dos últimas opciones deberían abordarse con sumo cuidado ya que tienen el potencial de ofrecer cierta garantía a largo plazo al municipio o un inversionista privado.

*Un concepto financiero, social y técnico sólido que permita la operación de un proyecto de aprovechamiento energético de residuos para cubrir los*

*costos, al igual que un arreglo institucional adecuado son requisitos previos y clave para el manejo sustentable de cualquier sistema de gestión integral de residuos sólidos.*

## 6. Enfoque del Estudio

Todas las actividades humanas generan residuos y estos deben ser gestionados y dispuestos en forma correcta, minimizando los posibles impactos sobre la salud y el medioambiente.

El crecimiento exponencial de la población en el último siglo combinado con un incremento en el consumo, ha llevado a una explosión en la cantidad de residuos producidos. Al mismo tiempo, resulta difícil encontrar sitios para la instalación de rellenos sanitarios, produciendo una enorme degradación del medio ambiente.

Tal cual se define: “... **La Gestión de Residuos Sólidos Urbanos (GRSU)** es la disciplina asociada al control de la generación, almacenamiento, recolección, transferencia y transporte, procesamiento y disposición final de los residuos, en forma armónica con los mejores principios de la salud pública, de la economía, de la ingeniería, de la conservación, de la estética y de los principios ambientales, respondiendo a las expectativas del público...”

Entendemos que es importante tener un buen estado de situación, para lo cual del material bibliográfico analizado podemos citar que: en la República Argentina se generan actualmente 44.623 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos (**RSU**). De las cuales más del 40% son incorrectamente tratadas y dispuestas, produciendo graves daños a la salud pública y al medio ambiente. Con respecto a la cobertura de disposición final de los RSU, se estima que entre el 50 al 55% de la población tiene un sistema adecuado de vertedero controlado y/o relleno sanitario.

La producción per cápita promedio de **RSU**, para el país es de 1,036 kg por habitante por día.

Tomando como base la composición promedio elaborada en base a datos de estudio de calidad de **RSU** analizado en la bibliografía consultada se estima que la cantidad de materiales potencialmente reciclajes sería del 11%.

Se estima que la generación de **RSU** para la Argentina para el próximo decenio será de 67.322 toneladas.

El estudio del presente trabajo está en función del análisis en cuanto a eficiencia ecológica, energética y beneficio social.

Las Tecnologías disponibles para el tratamiento de los **RSU**, aceptadas y probadas a nivel Internacional.

Dichas tecnologías son las siguientes:

»» Separación y reciclaje de los subcomponentes potencialmente reciclables.

»» Tratamiento Biológico de la Fracción rápidamente biodegradable, a través del tratamiento de compostaje en hileras con compost Turner. Utilización de Sistema de Tratamiento Biológico Mecánico (**MBT**).

»» **Valorización energética: Incineración con cogeneración de energía eléctrica de la fracción sobrante de los RSU.**

»» Disposición final de los rechazos y/o cenizas por medio de la técnica de relleno sanitario.

La producción per cápita (**PPC**) promedio diaria de residuos sólidos urbanos, para el país se estima del orden: 1,036 kg Habitante<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>.

De acuerdo al censo nacional de 2010, **Campana** cuenta con un total de 86.860 habitantes (INDEC, 2010). Lo cual representa un incremento del 11,5% frente a los 77,838 habitantes (INDEC, 2001) del censo anterior.

La Producción per cápita (**PPC**) promedio por rango poblacional (año 2010) para ciudades cuya población está comprendida entre 50.000 a 100.000 habitantes, es de **0,844** kg Habitante<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>.

Tomando como base la composición de los **RSU** promedio del país, se llevó a cabo la determinación teórica de la tratabilidad potencial de estos materiales para los diferentes tipos de tratamientos de residuos.

Al respecto se ha encontrado que:

»» Materiales potencialmente reciclajes: 11%

»» Materiales potencialmente compostables: 34%

»» Materiales potencialmente **combustionables**: 56%

A nivel mundial, la incineración se practica tratando de lograr la reducción de los volúmenes de residuos sólidos a ser dispuestos - ante los problemas con la disponibilidad de espacios, la reducción de la peligrosidad de los residuos - como es el caso de los desperdicios de hospitales, y a su vez, procurando aprovechar la posibilidad de recuperar energía.

En la página web de *El Atlas Mundial de la basura* se muestra un planisferio donde indica cada una de las plantas incineradoras de residuos y su ubicación. En los países y regiones donde existen numerosas plantas son Japón, Corea del Sur, la Unión Europea y China.



El Atlas de Residuos incluye información sobre vertederos y gestión de desechos en 164 países diferentes y 1.779 ciudades diferentes en todo el mundo. Utilizando el mapa podemos comparar y contrastar la cantidad de basura generada por diferentes países y ciudades y cómo se manejan estos residuos.

El descomunal aumento en la generación de residuos en China, produjo un boom de la incineración en la última década en ese país. Estas plantas tienen tasas de emisiones de dioxinas más altas que en los países desarrollados. Además, las cenizas volantes no son tratadas y suelen depositarse en vertederos a cielo abierto.

En EEUU, la incineración no es la tecnología más utilizada, debido principalmente a la ausencia de subsidios, y a los menores costos para la disposición en Rellenos Sanitarios.

Otros países que utilizan en menor medida esta tecnología y que poseen entre una y tres plantas instaladas son: India, Australia, Canadá, Rusia y Singapur.

En México Df, la empresa Veolia está construyendo la primera mega planta WtE de América Latina, que estaría operativa para el año 2020.

La elección de tecnologías **WtE** para la gestión de residuos en países de la Unión Europea y Japón, se basó fundamentalmente en las restricciones de

extensión de territorio para establecer rellenos sanitarios, y la existencia de subsidios para la generación de energía a partir de RSU. En los países nórdicos como Suecia, Noruega y Dinamarca, la numerosa cantidad de incineradoras no responde a una necesidad de gestionar sus residuos, sino más bien a una necesidad de soberanía energética por su alta demanda de calefacción urbana, de tal modo que llegan a importar residuos de otros países (como Reino Unido o Alemania) para su abastecimiento. Dinamarca es el país que porcentualmente más incinera de la UE y que más residuos per cápita genera.

Casi todos los países de la Unión Europea llevan a cabo el tratamiento de Incineración en mayor o menor medida, siendo Noruega, Dinamarca y Suiza los que encabezan la lista, seguido de Finlandia, Holanda, Suecia, Austria, Luxemburgo, Alemania y Bélgica, pero tal como indica el recorte periodístico de “La Vanguardia”:

“La Comisión Europea comunicó a principios de este año (2017) que ya no subvencionaría más incineradoras, con el fin de desincentivar estas prácticas y promover, en su lugar, una gestión de residuos enfocada a la economía circular, a partir del reciclaje o políticas de residuo cero.(...) En los países del norte, a menudo sucede que las incineradoras tienen sobrecapacidad, lo que se traduce en que, para amortizar sus costes, tienen que importar residuos de otros países.

Así, Dinamarca, “un gran incinerador”, quema en sus plantas de “Waste to Energy” (residuos a energía), la basura que traen de países como Reino Unido, el mayor exportador o Alemania. Esta tecnología aporta un 5% de la electricidad del país escandinavo y un 20% de la calefacción que éste produce.”(¿Las incineradoras aún son válidas para reciclar residuos urbanos? Periódico La Vanguardia, España. 2017).

En Enero de 2018, el Parlamento Europeo modificó la Directiva Marco de Energías Renovables, retirando los subsidios a la energía proveniente de la incineración, y definió priorizar la recuperación de basura a través de metas más ambiciosas de reciclado y compostaje, y apuntando al paradigma de la Economía Circular y el fomento de la producción y consumo sustentables.

En el Japón, el porcentaje de residuos sólidos incinerados llega hoy al 80%. La imposibilidad de disponer los residuos sólidos en rellenos sanitarios, a causa de la escasez de terrenos, llevó a este país a adoptar la incineración como alternativa de tratamiento, de forma intensiva. Actualmente dispone de centenares de incineradores. Sólo en Tokio funcionan trece usinas. En los Estados Unidos, de los 200 millones de toneladas de residuos sólidos generados por año, 16% es incinerado.

En Brasil, el primer incinerador para residuos sólidos municipales fue instalado en la ciudad de Manaus, en 1896, veintidós años después de la implantación de la primera unidad construida en el mundo en la ciudad de Nottingham, Inglaterra, en 1874.

Esa actitud pionera brasilera no continuó con un crecimiento en la utilización de la incineración como forma de tratamiento de los residuos sólidos domiciliarios. Por lo que, hoy en Brasil, los incineradores en uso no llegan a dos docenas.

En Caracas, Venezuela, recientemente fue instalado un incinerador dedicado únicamente al tratamiento de desechos tóxicos.

En Uruguay, la única experiencia en usinas de incineración es la de Montevideo, a principios de siglo XX. Es interesante conocer que previo a su instalación la Intendencia se debatía entre una planta de clasificación y reciclaje industrial y la incineración. En el debate formaba parte una comisión asesora técnica especialmente creada para dar solución a los residuos sólidos urbanos. Finalmente, en 1915, fueron instalados tres incineradores que trataron todos los residuos sólidos de la ciudad durante unas décadas. Eran las usinas 1, 2 y 3. La 1, en el centro de la ciudad, el que por motivos de contaminación atmosférica y de crecimiento urbano se demolió, se estima alrededor de los años 50.

La 2, en el oeste, la única que aún está en uso - se le hizo una readecuación en 1995 - en la que se incineran todos los residuos hospitalarios (unas 25 t/día), excepto los radioactivos; no alcanza las temperaturas establecidas y genera unas 3.2 t/día de cenizas que se llevan al vertedero. Finalmente la 3, al noreste, aunque aún existe, está fuera de uso desde hace pocos años.

Una planificación estratégica a largo plazo es esencial para implantar un horno incinerador con éxito. Los responsables de las decisiones necesitan conocer la influencia de una variedad de temas en el proceso de planificación, y definir:

- Quién asume la propiedad y las responsabilidades consiguientes, incluyendo los riesgos inherentes a la instalación.
- Quién toma las decisiones legales y de ingeniería;
- La selección y coordinación del suministrador del incinerador; • la venta de un producto (electricidad), en caso de que haya.

- La generación de capital, si fuera el caso anterior. La planificación a largo plazo dentro de la intendencia es la clave para el éxito del proyecto y la operación eficiente del horno incinerador.

En caso de incineración con recuperación de energía, se debe conocer:

- Composición de los residuos sólidos, directamente relacionada con la recuperación de la energía. La humedad y la reducción del porcentaje de plástico, por ejemplo, disminuyen la energía generada, elevando el costo por tonelada incinerada;
- La tarifa de la energía recuperada: la ganancia obtenida con la venta de la electricidad generada tiene gran influencia sobre el costo por tonelada incinerada.

En Europa existen decenas de incineradores de residuos sólidos municipales con recuperación de energía. La mayor parte de ellos tiene capacidad a partir de 200 t/día. Teniendo en cuenta que la energía eléctrica es más barata para nuestra región, considerando las condiciones de demanda y oferta de energía y otros factores de escala, parecería que la incineración de residuos municipales sería interesante económicamente para usinas con gran capacidad, posiblemente en el rango de 1.000 t/día.

En la página web del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente de España se indica que del resultado del proceso de incineración se obtiene: Gases y Residuo Sólido.

A modo introductorio en el tema podemos citar:

Las emisiones y consumos en las incineradoras de residuos están influenciadas principalmente por:

La composición y contenido de los residuos;

Las medidas técnicas del horno (diseño y funcionamiento);

Diseño y operación del equipo de limpieza de gases de combustión.

Emisiones a la atmósfera: Las emisiones de HCl, HF, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y metales pesados dependen principalmente de la estructura de los residuos y de la calidad de la limpieza de los gases de combustión.

Las emisiones de CO y VOC vienen determinadas principalmente por los parámetros técnicos del horno y por el grado de heterogeneidad de los residuos cuando alcanzan la etapa de combustión. El diseño y la operación del horno afectan también en gran medida el nivel de NO<sub>x</sub>.

Las emisiones de polvo dependen mucho de la eficacia del tratamiento de los gases de combustión.

Las emisiones a la atmósfera de PCDD/PCDF dependen de la estructura de los residuos, del horno (temperatura y tiempos de residencia) y condiciones operativas de la planta (la reformación y síntesis de novo son posibles bajo ciertas condiciones) y la eficacia de la limpieza de los gases de combustión.

Gases de combustión: Son compuestos principalmente por  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  no reaccionado,  $\text{N}_2$  del aire empleado para la combustión y otros compuestos en menores proporciones procedentes de los diferentes elementos que formaban parte de los residuos. Los componentes minoritarios presentes dependerán de la composición de los residuos tratados. Así pues, pueden contener gases ácidos derivados de reacciones de halógenos, azufre, metales volátiles o compuestos orgánicos (como dioxinas y furanos) que no se hayan oxidado. Finalmente los gases de combustión contendrán partículas, que son arrastradas por los gases.

Las plantas de incineración de residuos urbanos producen generalmente volúmenes de gases de combustión (a un 11 % de oxígeno) entre 4500 y 6000  $\text{m}^3$  por tonelada de residuos. Las plantas que utilizan pirólisis, gasificación o suministro de aire enriquecido con oxígeno producen menores volúmenes de gases de combustión por tonelada de residuo incinerado.

“Las emisiones gaseosas están consideradas como la principal fuente de contaminación potencial que existe en una incineradora. Los agentes contaminantes que pueden encontrarse en los gases de combustión son los compuestos de cloro, los de flúor, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, sustancias orgánicas, partículas, metales pesados y dioxinas y furanos. Los controles establecidos en los documentos legales de los diferentes Estados y organismos supranacionales pretenden, en función del estado de la técnica, hacer compatible la posible contaminación originada en el entorno de estas instalaciones con los beneficios que presenta la eliminación de los residuos por incineración.

Residuo sólido: Compuesto fundamentalmente por escorias inertes, cenizas y residuos del sistema de depuración de los gases de combustión. El calor que llevan los gases a la salida de la cámara de postcombustión, se puede aprovechar para calentar agua, que se utiliza como calefacción o como generador de vapor para usos industriales o para generar energía eléctrica mediante un conjunto de turbina de vapor y alternador.

Las emisiones procedentes de una incineradora deben cumplir los límites que fijan las normas legales por lo que es preciso dotar a la instalación de una serie de técnicas capaces de retener los diferentes tipos de contaminantes.

A medida que van disminuyendo los límites de las emisiones aumenta la complejidad del proceso de depuración. Independientemente de los niveles fijados es preciso disminuir la concentración de un conjunto de contaminantes que se comentan a continuación. Los valores numéricos para cada uno de ellos corresponden a los valores representativos de una incineradora moderna, valores que son inferiores a los establecidos por la legislación.

**Partículas:** Forman parte de estas partículas las cenizas volantes y los finos arrastrados en el horno, los componentes condensados y los reactivos y productos de reacción formados como consecuencia de los compuestos empleados en equipos de depuración para otros contaminantes. Por ello, el método de retención depende tanto del tipo de horno como del sistema de depuración general. La propia caldera de recuperación constituye un elemento de eliminación de partículas que complementado con ciclones, precipitadores electrostáticos, filtros de mangas o filtros cerámicos limita las emisiones a valores inferiores a  $10 \text{ mg/Nm}^3$  pudiendo alcanzarse valores entre 10 y 100 veces menores.

Muchos metales pesados solo aparecen en fase sólida, Pb, Cr, Cu, Mn, Ni, con lo cual sus emisiones dependerán de que se realice una adecuada separación de los materiales que los contengan y de la eficacia de la tecnología empleada para retener las partículas.

Los restantes metales pesados de interés medioambiental, Cd, Hg, As, aparecen tanto en las partículas sólidas como en la fase gaseosa. Por este motivo su retención requiere el empleo de una técnica adicional.

**Monóxido de carbono:** El CO es un gas tóxico inodoro. El monóxido de carbono (CO), en el gas de combustión de las plantas de incineración, es producto de la combustión incompleta de compuestos de carbono. El CO se produce cuando hay insuficiente oxígeno localmente y/o una temperatura de combustión insuficientemente alta para realizar la oxidación completa a dióxido de carbono. En particular, esto puede ocurrir si hay presentes sustancias que se evaporan espontáneamente o combustionan rápidamente, o cuando la mezcla del gas de combustión con el oxígeno suministrado es mala. La medición continua del nivel de CO puede usarse para comprobar la eficiencia del proceso de incineración. El CO es una medida de la calidad de la combustión. Si las emisiones de CO son muy bajas, la calidad de combustión del gas es muy alta y las emisiones de **TOC** son también bajas (y viceversa). [74, TWG Comments, 2004]

Tras su emisión a la atmósfera, el CO se oxida a  $\text{CO}_2$ , al cabo de un tiempo. En particular, deben evitarse elevadas concentraciones de CO (> límite de

explosividad inferior), ya que pueden causar mezclas explosivas en el gas de combustión.

En particular, en las plantas incineradoras de residuos peligrosos, puede producirse un aumento de las emisiones de CO con algunos residuos en bidones.

El nivel de CO en las plantas se mide continuamente. Se consiguen medias diarias de emisiones de CO por debajo de 50 mg/Nm<sup>3</sup>; en algunas plantas, las medias diarias están bastante por debajo de esta cifra [64, TWGComments, 2003]

Se reporta que el tratamiento de NO<sub>x</sub> con RCS puede aumentar los niveles de emisión de CO. [74, TWGComments, 2004]

Carbono orgánico total (**TOC**): Este parámetro incluye una serie de sustancias orgánicas gaseosas, cuya detección individual es generalmente compleja o imposible. Durante la incineración de residuos orgánicos se produce un gran número de reacciones químicas, algunas de las cuales son incompletas. Esto lleva a un patrón extremadamente complejo de compuestos en cantidades de trazas. No se dispone de una relación completa de todas las sustancias incluidas en el parámetro de TOC, aunque la incineración suele ofrecer altas eficiencias de destrucción para sustancias orgánicas.

El **TOC** puede medirse continuamente en el gas de combustión. Bajos niveles de **TOC** son indicadores clave de la calidad de combustión en un proceso de incineración.

Se observan emisiones en el rango de 0,1 mg/Nm<sup>3</sup> a 10 mg/Nm<sup>3</sup>. [64, TWGComments, 2003]

Gases ácidos: SO<sub>2</sub>, HCl, HF: Los tres componentes ácidos SO<sub>2</sub>, HCl (compuestos inorgánicos con cloro) y HF (compuestos inorgánicos con flúor) se forman en el proceso de combustión a partir de los residuos alimentados. En consecuencia, las cantidades formadas dependen directamente de la composición de los residuos incinerados. Su retención puede efectuarse de diferentes maneras.

En el horno de combustión puede incorporarse carbonato cálcico y con una buena mezcla en su interior y un tiempo de residencia suficientemente elevado se logran retenciones del 90% para azufre y flúor y del 50% para el cloro. Los productos formados son sólidos que abandonan el sistema formando parte de las escorias y de las cenizas en forma de sales cálcicas.

Cuando en la corriente de gases se introduce un neutralizador (normalmente cal) en forma pulverizada se dispone de un procedimiento en

seco que se caracteriza por un consumo alto de reactivos y la consecución de rendimientos medios.

En el procedimiento semiseco se atomiza la lechada de cal en el flujo gaseoso con lo que disminuye el consumo de reactivos y permite alcanzar buenos rendimientos. En ambos casos no existe vertido de agua. El procedimiento húmedo permite obtener rendimientos altos y bajos consumos de reactivos reteniendo incluso otros contaminantes (partículas,  $\text{NO}_x$ ) pero se generan aguas de lavado que es preciso tratar antes de su vertido. La elección adecuada del proceso permite que HCl sea inferior a 10  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ , que HF sea menor que 2  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  y que el  $\text{SO}_2$  no supere los 50  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ .

Dioxinas y furanos: Las fuentes naturales de estos compuestos están relacionadas con el fuego o los procesos de combustión, como los incendios forestales, la caída de rayos o la acción volcánica y en general, cuando se produce la combustión de hidrocarburos en presencia de compuestos de cloro. En la incineración de residuos sólidos aparecen los elementos necesarios para que sea posible la formación de dioxinas y furanos. Desde que Olie encontró niveles elevados de estos organoclorados en emisiones gaseosas y en cenizas de incineradoras y posteriormente en la leche de las vacas de las granjas cercanas a la incineradora, se considera a este proceso como la fuente más importante de generación de dioxinas y furanos. Normalmente aparecen en concentraciones tan pequeñas que su unidad de medida es el nanogramo, lo cual obliga a utilizar procedimientos de muestreo y métodos analíticos adecuados a este problema.

La destrucción de estos contaminantes y también la de sus precursores se logra cuando la combustión es correcta y se mantienen la temperatura de postcombustión por encima de  $850^\circ\text{C}$  durante más de 2 segundos con una concentración de oxígeno superior al 6%. Sin embargo, es posible encontrar estos contaminantes al final del sistema de depuración, debido a que se formen de nuevo. La síntesis de estas dioxinas ex novo se produce en un intervalo de temperatura comprendido entre  $200^\circ\text{C}$  y  $400^\circ\text{C}$ , cuando existe una fuente de carbono y partículas con contenido metálico, que actúan como catalizadores.

Por ello es fundamental, para minimizar la formación ex novo una combustión correcta y un descenso brusco de la temperatura de  $400^\circ\text{C}$  a  $200^\circ\text{C}$  para que el tiempo durante el cual los gases se encuentran dentro de este intervalo sea lo más pequeño posible.

A pesar de estas medidas debe esperarse su formación en cantidades, aunque muy pequeñas, suficientemente elevadas para que su valor sea

superior a  $0,1 \text{ ng/Nm}^3$ , límite para estos contaminantes. Por esta razón el sistema de depuración de gases debe incorporar un procedimiento capaz de garantizar que las emisiones cumplen el límite establecido.

Frente a los procesos de destrucción de dioxinas por métodos catalíticos, catalizadores tipo SCR, las técnicas de adsorción sobre carbón activo son las que se emplean en las instalaciones industriales.

Resumiendo las dioxinas son una clase de sustancias organoclorados entre los que hay algunos compuestos extremadamente tóxicos. Pueden estar presentes en el residuo.

Alcanzan también a formarse en ciertas condiciones, durante el enfriamiento de los gases incinerados, en el rango de los  $300^\circ\text{C}$ . Pueden, además, formarse en irregularidades operacionales que perjudican la incineración. Aunque no existan dioxinas en un residuo, su formación puede ocurrir durante el enfriamiento de los gases de evacuación del incinerador. Existen evidencias de la presencia de dioxinas en concentraciones superiores a  $30 \text{ ng/Nm}^3$ . Una solución posible para evitar la formación de dioxinas que ocurre luego de la incineración, es enfriar bruscamente los gases de salida. Con todo, esta técnica puede ser conflictiva con la estrategia de recuperación de energía.

En el caso que este enfriamiento brusco no sea posible, un sistema de tratamiento de gases adecuado quitará las dioxinas junto con el material particulado, terminando en el relleno.

La agencia ambiental norteamericana - Environmental Protection Agency EPA - estableció el límite de  $30 \text{ ng/Nm}^3$  para el total de dioxinas y furanos emitidos por los incineradores de residuos sólidos municipales con capacidad igual o mayor que  $250 \text{ t/día}$ . En Alemania, el límite para la emisión de estos compuestos en incineradores de residuos peligrosos es  $0,1 \text{ ng/Nm}^3 \text{ TEQ}$  (unidad de equivalencia de toxicidad, que tiene como referencia la 2, 3, 7, 8 - tetracloro - dibenzo-para-dioxina).

Realizar los análisis de detección de dioxinas y furanos implica contar con equipos de alta tecnología y personal capacitado.

El procedimiento de corriente volante que incorpora carbón activo en polvo en los gases de salida permite conseguir retenciones superiores al 90% siempre que el contacto sea suficientemente eficaz. También se retienen otros contaminantes, como los metales pesados es fase gas, pero tiene el inconveniente del consumo continuo de un material costoso que pasa a formar parte de las cenizas volantes que se recogen en el último equipo de filtrado. Para evitar este inconveniente se ha propuesto el empleo de los monolitos de carbón activo antes de que los gases de escape lleguen a la chimenea.

En una apretada síntesis vamos y en función del carácter integrador del presente trabajo, la tecnología disponible para control de dichas emisiones.

**Control de material particulado:** Filtros de tejido, llamados filtros manga, precipitadores electrostáticos y lavadores Venturi son los dispositivos para controlar la emisión de partículas. Los filtros manga son diseñados con largas bolsas hechas con tejido resistente al calor que capturan partículas finas. El polvo y las partículas son recolectados y dispuestos. Los precipitadores electrostáticos tratan las emisiones con la aplicación de un voltaje en las partículas que entran, cargándolas negativamente. Las partículas, entonces, son quitadas en placas cargadas positivamente. Usan campos electrostáticos múltiples para recolectar el máximo de material particulado. Los lavadores Venturi utilizan grandes volúmenes de agua en forma de gotitas que impactan la corriente gaseosa de manera de capturar las partículas, que en este caso son enviadas a una estación de tratamiento de efluentes líquidos.

**Control del gas ácido:** Las unidades de control de gas ácido más comunes son las llamadas scrubbers. Scrubbers de cal seguidos por filtros manga son considerados la mejor tecnología de control de gas ácido.

Un lodo de cal que reacciona con los gases ácidos es atomizado en el scrubber. El agua del lodo evapora enfriando el gas. El particulado y los productos de la reacción anterior son retenidos por un filtro manga.

Este tipo de sistema es usado para controlar las emisiones de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), ácido clorhídrico (HCl), partículas, metales y dioxinas y furanos. Otro sistema de control de gas ácido es el de inyección de absorbente seco (IAS) seguido por enfriamiento del gas y precipitador electrostático.

Existen dos diferentes métodos de IAS. Uno involucra la inyección de álcali seco como cal hidratada en el gas de combustión después de la cámara de combustión. El otro método inyecta el absorbente directamente en la cámara de combustión.

Los óxidos de nitrógeno no son eliminados por este proceso. Se debe minimizar su generación mediante el control de las condiciones de incineración, con quemadores adecuados en la segunda cámara. Además de estos métodos citados, la separación de materiales antes de la combustión también puede reducir las emisiones, en especial las emisiones de metales.

Los materiales que pueden contribuir con emisiones perjudiciales son:

- Piezas soldadas con plomo, como recipientes de hojalata.
- Pilas domésticas o de uso médico, que contienen metales pesados, como mercurio y cadmio.

- Baterías de plomo-ácido (para vehículos), que son una de las principales fuentes de plomo en los residuos sólidos municipales.
- Ciertos plásticos, como PVC, que pueden ser precursores de la formación de dioxinas.
- Residuos de jardines, que pueden perjudicar la combustión debido a su humedad variable.

Esta lista contiene muchos materiales reciclables o compostables, que refuerzan la idea de que los programas de reciclaje y de compostaje pueden tener un impacto positivo en la operación de las instalaciones de combustión de residuos sólidos.

A continuación se presentará el **Marco Legal** en el cual enmarcaremos nuestro estudio.

En la República Argentina, la gestión integral de residuos sólidos urbanos está regulada por la Ley 25.916 que establece “los presupuestos mínimos de protección ambiental para la gestión integral de los residuos domiciliarios, sean éstos de origen residencial, urbano, comercial, asistencial, sanitario, industrial o institucional, con excepción de aquellos que se encuentran regulados por normas específicas.”<sup>1</sup>

Las leyes de presupuestos mínimos se encuentran contempladas en el artículo 41 de la Constitución Nacional y se regulan de acuerdo al artículo 6° de la Ley 25.675, conocida como Ley General de Ambiente (LGA).

Una ley de presupuestos mínimos es “toda norma que concede una tutela ambiental uniforme o común para todo el territorio nacional, y tiene por objeto imponer condiciones necesarias para asegurar la protección ambiental. En su contenido, debe prever las condiciones necesarias para garantizar la dinámica de los sistemas ecológicos, mantener su capacidad de carga y, en general, asegurar la preservación ambiental y el desarrollo sustentable.”<sup>2</sup>

La mencionada Ley de Gestión de Residuos Domiciliarios (LGRD) define como residuo domiciliario a “aquellos elementos, objetos o sustancias que como consecuencia de los procesos de consumo y desarrollo de actividades humanas, son desechados y/o abandonados.”<sup>3</sup>

De acuerdo a esta norma, la gestión integral de residuos domiciliarios comprende las etapas de generación, disposición inicial, recolección, transferencia, transporte, tratamiento y disposición final.

La ley establece que los generadores, sean estas personas físicas o jurídicas, tienen la obligación de realizar el acopio y la disposición inicial de los residuos.

Esta disposición puede ser con clasificación y separación o sin ella. La responsabilidad de la “autoridad competente,”<sup>4</sup> que son las autoridades establecidas por las jurisdicciones locales, comienza con la recolección de los residuos mediante el acopio y carga en los vehículos recolectores.

Los municipios están a cargo del mantenimiento de la higiene urbana, lo que incluye el barrido de la vía pública y la recolección de los residuos domiciliarios.

Una de las etapas más importantes en la gestión municipal de los residuos sólidos urbanos es la de tratamiento, que comprende el conjunto de operaciones tendientes al acondicionamiento y valorización de los residuos. Por último, la disposición final comprende al conjunto de operaciones destinadas a lograr el depósito permanente de los residuos domiciliarios, así como de las fracciones de rechazo inevitables resultantes de los métodos de tratamiento adoptados.

Por su parte, en el ámbito de la provincia de Buenos Aires se sancionó en el año 2006 la Ley N° 13.592 de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos, reglamentada recién en el año 2010, que tiene por objeto fijar los procedimientos de gestión de los residuos sólidos urbanos de acuerdo con las normas establecidas en la ley nacional<sup>5</sup>.

La ley provincial establece como objetivos de política ambiental en materia de RSU:

1. Incorporar paulatinamente en la disposición inicial, la separación en origen, la valorización, la reutilización y el reciclaje en la gestión integral por parte de todos los municipios de la Provincia de Buenos Aires.
2. Minimizar la generación de residuos, de acuerdo con las metas establecidas por la ley y su reglamentación.
3. Diseñar e instrumentar campañas de educación ambiental y divulgación a fin de sensibilizar a la población respecto de las conductas positivas para el ambiente y las posibles soluciones para los RSU, garantizando una amplia y efectiva participación social
4. Incorporar tecnologías y procesos ambientalmente aptos y adecuados a la realidad local y regional.

En la provincia de Buenos Aires cada municipio es responsable de la gestión de los residuos que se generan en su localidad.

---

<sup>1</sup> Ley nacional 25.916, artículo 1°

<sup>2</sup> Ley nacional 25.675, artículo 6°

<sup>3</sup> Ley nacional 25.916, artículo 2°

<sup>4</sup> Ley nacional 25.916, Capítulo II

En función de ello, deben instrumentar y llevar a la práctica las medidas conducentes para cumplimentar los objetivos de la ley, sin perjuicio de las atribuciones que la norma le asigna a la provincia.

Por su parte, al igual que en el caso de la CABA, la ley provincial también exige la reducción gradual de los desechos que se entierran. En tal sentido dispone que a partir de la aprobación de cada uno de los programas por parte del Ejecutivo provincial, los municipios tendrán un plazo de cinco años para que las distintas jurisdicciones alcancen una reducción del 30% de la totalidad de los residuos con destino a la disposición final, comenzando en el primer año con una campaña de concientización, para continuar con una progresión del 10% para el segundo año y efectuando obligatoriamente la separación en origen como mínimo en dos fracciones de residuos, 20% para el tercer año y el 35% para el quinto año, siendo política de estado tender a profundizar en los años siguientes dicho porcentajes. Sin embargo, y más allá de los textos legales señalados, las cifras de residuos enviadas a la CEAMSE para su disposición final, tanto por la CABA como por la provincia de Buenos Aires no han disminuido, con la particularidad que en la provincia de Buenos Aires existe la amenaza siempre.

En la Ciudad de Buenos Aires la normativa que regula la gestión de los RSU es la Ley 1.854, conocida como de Basura Cero, la cual ha sido recientemente modificada por la Ley 5.966 que, entre otras cosas, incorpora la valorización energética y establece un nuevo cronograma de reducción progresiva de la disposición final a un 50% para el 2021, de un 65% para el 2025 y un 80% para el 2030, tomando como base los niveles enviados al CEAMSE durante el año 2012, prohibiendo para el 2028 la disposición final de materiales tanto reciclables como aprovechables.<sup>6</sup>

Como se ve, la gestión de los residuos es prioritariamente del municipio donde estos se generan, si bien la LGRD establece una autoridad de aplicación nacional, que actualmente es la Secretaria de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, y un ámbito de coordinación interjurisdiccional que es el Consejo Federal de Medio Ambiente (COFEMA).

Las autoridades nacionales de ambiente solo gestionan un crédito del Banco Interamericano de Desarrollo (BID 3249/OC-AR) para el saneamiento de basurales a cielo abierto, que en la práctica financia una estrategia de GRSU en el municipio. Esta experiencia ha sido exitosa en los municipios incluidos, pero la aprobación de proyectos ha sido escasa en los últimos años.<sup>7</sup>

En la práctica, el costo de esta gestión ambiental es casi exclusivamente devengado por los municipios.

Si bien existen programas nacionales y una Estrategia Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos (ENGIRSU) que va desde el 2005 al 2025, el costo de esta gestión municipal se encuentra financiada por los recursos recaudados por el municipio y solo en parte por el gobierno provincial, como ya veremos más adelante.

Otra ley nacional importante en la gestión de los residuos es la Ley N° 24.051 de Residuos Peligrosos aprobada en 1991 como ley de adhesión ya que es anterior a la Constitución Nacional del 1994 que crea los “presupuestos mínimos ambientales.” El resultado ha sido que cada provincia ha adoptado un régimen normativo propio adhiriendo a los términos de la normativa nacional aunque en algunos casos se han sancionado regulaciones alternativas.

Por otra parte, la Argentina es signataria de varios acuerdos multilaterales sobre el medio ambiente que establece la regulación en materia de residuos y gestión integral de sustancias químicas.

Estos convenios, ratificados por el Congreso argentino, son: el Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su eliminación, el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes, el Convenio de Rotterdam sobre procedimientos aplicables a ciertos plaguicidas y productos químicos peligrosos, y el Convenio de Matamata sobre el uso del mercurio.

## 7. Método de investigación

Tipo de investigación: *“El tipo de investigación es de análisis descriptivo, tomando como base la información de teorías existentes y trabajos realizados. Esta investigación documental estudia el problema con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento desde su naturaleza. La originalidad del trabajo es el enfoque de reflexión, recomendaciones y conceptualizaciones generadas por el autor”.* (Sabino., Carlos, 1994, s.p).

Propuesta de diseño investigación: Para la realización de este trabajo se parte de la revisión bibliográfica realizada a nivel nacional e internacional y

---

<sup>5</sup> Ley de la Provincia de Buenos Aires 13.592, artículo 6

<sup>6</sup> <http://www2.cedom.gov.ar/es/legislacion/normas/leyes/ley1854.html> La Ley 5.966 se encuentra siendo revisada en la Justicia, pero en la actualidad está en plena vigencia

la experiencia del autor en generación de vapor (ing. Seniors de Proceso), parte de la información recolectada ante la coyuntura de la pandemia esto limitó sensiblemente el trabajo de campo.

Consistente en las siguientes etapas la cuales se detallan a continuación: En el desarrollo del proyecto se realizó un análisis comparativo donde se identificarán aspectos metodológicos para la complementación del estudio que se realizará en la búsqueda de los mejores procedimientos dando solución a lo planteado en el problema, lo cual incluye tanto el trabajo de campo (limitado) como de gabinete, levantamiento de información primaria y secundaria, identificación y evaluación de impactos.

La formulación metodológica y comparativa, a efectuar a partir de las salidas de campo, búsqueda y análisis de información, registros, monitoreos, verificación bibliográfica y demás elementos que contribuyan a desarrollar unos procedimientos viables y aplicativos en campo para dar solución y seguimiento de cada una de las actividades en las que se involucre cualquier tipo de residuo sólido.

Se ejecutaron varias salidas de campo, realizando recorridos exploratorios en la zona donde se realiza el estudio de la especialización con el fin de tomar diferentes puntos como referencia y evidencia de la problemática actual y de interés para este proyecto.

Para complementar la información en cuanto a las afectaciones ambientales en las áreas de influencia se identificarán de las mejores alternativas o procedimientos a seguir, y acudir a información primaria obtenida por observación directa en campo y también se realizaron entrevistas informales a algunos de los operadores de maquinaria y equipos como ayudantes directos en labores determinadas.

## **8. Resultados**

Dentro de los objetivos establecidos, se consignó a modo de experiencia pedagógica desarrollar en la cátedra de Tecnología del Calor del cuarto nivel de la carrera de Ingeniería Mecánica UTN Facultad Regional Delta, trabajos de investigación, que incluyan dentro del metodología de cálculo y diseño, el aspecto ambiental en un enfoque superador e integrador.

Paso seguido se realizará una exposición de los **contenidos troncales mínimos** sobre los cuales se sustentaron los trabajos de investigación.

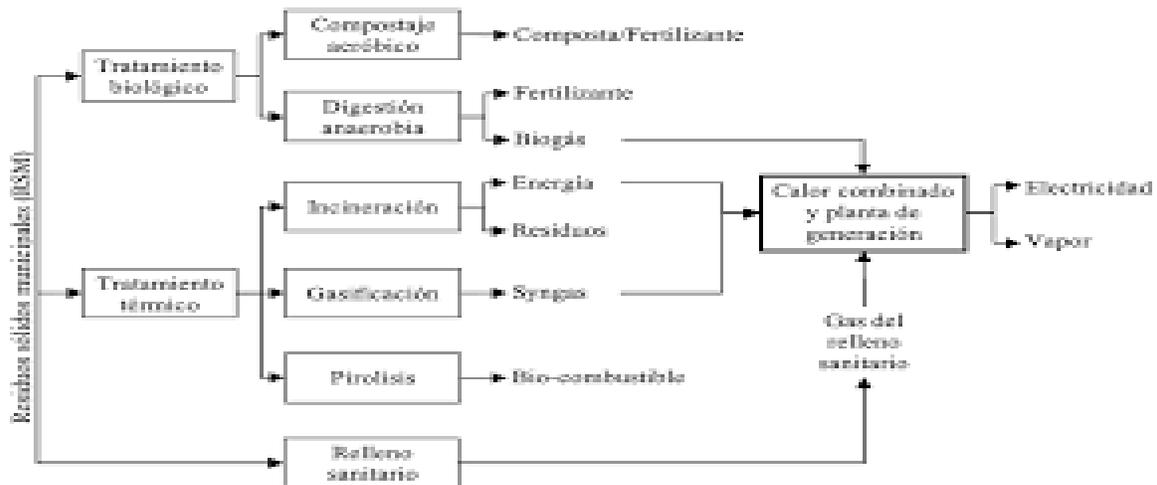
**Incineración** → La incineración de los **RSU** es un tratamiento térmico de carácter destructivo de los componentes de entrada, es una combustión controlada en la cual se reduce el volumen y se puede aprovechar la energía liberada en el proceso. La gran preocupación es en términos ambientales la emisión de gases complejos de carácter peligroso, entre los que se encuentran las dioxina y furanos como producto de la combustión de los RSU (OEI, 2008).

**Incineración** → La Incineración se define como un “Proceso por el que se someten los materiales sólidos y líquidos, sean residuales o no, a un régimen de temperaturas medias (850 - 1.200 °C), por efecto de las reacciones de oxidación exotérmica de los propios residuos y, si es preciso, de combustible aportado, en presencia de exceso de oxígeno suficiente para que casi toda (>99,99%) la fracción orgánica presente pase a la forma gaseosa, los compuestos oxidables a esa temperatura se hayan combinado con el oxígeno, y la fracción inorgánica se haya reducido a escorias (vidrio, piedras, metales) y cenizas” (Castells, 2005).

**Tecnologías disponibles** → Para la combustión de RSU, las principales son: • Hornos de lecho fluidizado. • Hornos de parrillas • Hornos rotativos.

**Rendimiento de un Incinerador** → El rendimiento de un sistema de incineración no depende esencialmente del tipo de horno, es decir, igual rendimiento pueden dar hornos del tipo rotativo, parrilla, o lecho fluidizado. Desde esta óptica el rendimiento debe definirse como la transformación de sólidos combustibles en gases, ver Figura 1. Al dar el rendimiento de un sistema horno-caldera es importante fijar el poder calorífico del residuo tratado, ya que al incrementar el PCI aumenta el rendimiento debido a que el volumen de gases de combustión es relativamente mayor para mayores PCI. Cuanto menor sea, menor energía generada (Castells, 2005).

En resumen, la incineración consiste en un sistema de conversión energético con un rendimiento global del orden del 20% al 24% (Castells, 2005). Sin embargo, Poletto y da Silva (2009) reportan eficiencias teóricas del 28% para plantas de incineración de RSU, al igual que Morales (1981) de acuerdo con datos experimentales obtenidos de instalaciones en funcionamiento.



**Figura 1.** (Fuente: “Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos” - Documento BREF)

**Expresión matemática del Rendimiento de un Incinerador** <sup>1</sup> → Los datos requeridos para el cálculo se hallan por lo general disponibles en plantas de incineración y se miden o calculan a partir de cifras de dimensiones como parámetros de vapor.

$$PCN = (1,133 \times (m_{st w}/m) \times C_{st x} + 0,008 \times T_b)/1,085 \text{ (GJ/tonelada)}$$

PCN = poder calorífico inferior (PCI) del residuo incinerado con  $m_{st w}/m \geq 1$  (GJ/ tonelada)

Donde,

$$m_{st w} = m_{st x} - (m_f \times (C_f/C_{st x}) \times \eta_b)$$

$m_{st w}$  = cantidad del vapor producida a partir de los residuos en el mismo periodo de tiempo que  $m_{st ej}$ . por año (tonelada/año)

$m_{st x}$  = cantidad total de vapor producida en un periodo de tiempo definido, ej. Por año (tonelada/año)

$m_x$  = cantidad de combustible suplementario utilizado en el periodo de tiempo correspondiente, ej. Por año (tonelada/año)

$m$  = masa de residuos incinerados en el periodo de tiempo definido ej. por año (tonelada/año)

$C_{st x}$  = entalpía neta del vapor, es decir, entalpía del vapor menos entalpía del agua de la caldera (GJ/tonelada)

$C_f$  = poder calorífico neto del combustible suplementario que se agrega a la producción de vapor (GJ/tonelada)

$T_b$  = temperatura del gas de combustión después de la caldera a un 4-12 %  $O_2$  en el gas de combustión (°C)

0,008 = contenido energético específico en el gas de combustión (GJ/tonelada x°C). 1,133 y 1,085 son constantes derivadas de ecuaciones de regresión

$\eta_b$  = eficiencia de intercambio de calor a la caldera (aprox. 0,80)

Nota: Este cálculo de PCN es sólo aplicable a plantas existentes y no a efectos de dimensionado de plantas nuevas. También debe observarse que la fórmula puede aplicarse en un rango operativo de 4-12 % O<sub>2</sub>, cuando el punto del diseño original era de un 7-9 % O<sub>2</sub>. Las plantas diseñadas con concentraciones de O<sub>2</sub> fuera del rango de 7-9 % requerirían el uso de coeficientes modificados para mantener la precisión.

**Poder Calorífico** → El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía (KJ o kcal) que produce la combustión de 1 kilo del mismo.

**Poder Calorífico Superior (PCS)** → Es el calor que desprende 1 kilo de combustible completamente seco, contando con el calor latente de vaporización del agua formada por la combustión del hidrógeno (si lo hay) (Castells, 2005).

**Poder Calorífico Inferior (PCI)** → Es la cantidad de calor neto desprendido por unidad de combustible sin enfriar o condensar los productos de la combustión, con lo que se pierde el calor contenido en el vapor de agua formado en la combustión. El **PCI** es siempre menor que el **PCS**, y es el valor que se tiene en cuenta al hablar de las cualidades energéticas de un producto (Castells, 2005).

En los procesos industriales no se aprovecha el calor de condensación del vapor, puesto que los gases se evacúan a una temperatura superior al punto de rocío. De ahí que en la práctica se use el poder calorífico inferior (PCI). Obviamente, en los combustibles exentos de hidrógenos el PCS y el PCI coinciden (Castells, 2005).

**Poder Calorífico Inferior Útil (PClu)** → Si el combustible está húmedo (*h* porcentaje de agua) interviene el concepto de poder calorífico inferior útil (**PClu**) que según Castells (2005), vale ~:  $PClu = PCI (1-h) - 600 h$

**Humedad** → Dentro de las propiedades físicas de los **RSU** se destaca la humedad, presente en los **RSU**, oscila alrededor del 40% en peso, con un margen que puede situarse entre el 25 y el 60%. La máxima aportación la proporcionan las fracciones orgánicas, y la mínima, los productos sintéticos. Esta característica debe tenerse en cuenta por su importancia en los procesos de compresión de residuos, producción de lixiviados, transporte, procesos de transformación, tratamientos de incineración y recuperación

energética y procesos de separación de residuos en plantas de reciclaje (Ambientum, s.f.).

En los residuos urbanos, la humedad tiende a unificarse y unos productos ceden humedad a otros. Esta es una de las causas de degradación de ciertos productos como el papel, que absorbe humedad de los residuos orgánicos y pierde características y valor en los procesos mecánicos de reciclaje sobre el reciclado en origen, que evita este contacto (Ambientum, s.f.).

**Producción de Cenizas o Escorias** → Aunque la incineración reduce el volumen de los residuos considerablemente, alrededor de un 70%, las cenizas que se generan y qué hacer con ellas sigue siendo un problema. Una gran parte de las cenizas va a parar a los vertederos, lo que es una solución parcial: si bien es un volumen menor de residuos, lo cierto es que se genera basura muy rápidamente, y los vertederos crecen desmesuradamente (CSIC, 2003).



Así bien de acuerdo con Castells (2005) las escorias son un síntoma de la eficacia de la combustión, expresado de la siguiente manera.

**Escorias bien quemadas:** proceden de las grandes instalaciones de incineración en continuo. Suelen representar el 10% del residuo respecto al **RSU** entrante en volumen o entre el 20% y el 30% del residuo en peso.

**Escorias Intermedias:** Corresponden a aquellos hornos que generan el 20% de residuo en volumen o bien del 25% al 35% del residuo entrante en peso.

**Escorias mal quemadas:** Se producen en procesos intermitentes de alimentación muy deficiente. Su cantidad supone entre el 30% y el 40% en volumen respecto al total del residuo entrante.

<sup>1</sup> Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC) "Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos" - Documento BREF

## Simulación

Se denomina modelo al conjunto de conceptos y ecuaciones que nos permiten aproximarnos a la realidad de un fenómeno, existen diversas herramientas informáticas que permiten la creación de formulaciones predefinidas sobre diferentes casos específicos (Paredes, 2004).

A los efectos de dotar a los alumnos de escenarios de comparación a través de diversos postulados se recomendó la utilización del software STELLA versión 7.0.2 para Windows.

A modo de comentario final, los objetivos propuestos de integración de los tópicos ambientales en un proyecto ingenieril, más allá del concepto de articulación de las asignaturas de la carrera y del desarrollo de las distintas incumbencias en el alumno, se intentó dotar al futuro profesional de una visión amplia y de fijar que el estudio y consideración del impacto ambiental no es algo secundario sino que permite el desarrollo sostenible y sustentable.

Como cierre proponemos como reflexión una cita extractada de *Análisis de la Educación Ambiental en la Universidad de F. Martín Molero*: Parece que el ser humano advierte las consecuencias que algunas de sus actividades causan sobre el medio ambiente hace más de cien años. Y entendiendo el medio en sentido amplio y, no exclusivamente como medio natural o físico, por lo menos hubo de advertirlo la primera vez que ideé la guerra como el método para dirimir las diferencias intra especie. Y, sin embargo, el ser humano no adopta cambios en su comportamiento, ni siquiera una revisión acerca de sus actuaciones inadecuadas, las que más degradan su medio, a fin de articular medidas preventivas y resolutorias.

El pronóstico de Felger (Cfr. Voight 1969, 1971) que dice textualmente: «*en nuestro planeta seguirá habiendo vida durante millones de años, pero el hombre quizá haya desaparecido dentro de cien años*» como, todavía, no despierta credibilidad tampoco con lleva acciones en el sentido de reflexionar sobre las actividades o comportamientos de la especie humana durante su vida en la Tierra.

Esta consideración introductoria, a propósito de la educación ambiental, viene a subrayar el sentido y valor trascendente de la acción humana en su estar en el mundo y relacionarse con él. Pero, sobre todo, quiero destacar la trascendencia de la acción como componente esencial del concepto «**educación**»; ya que, la degradación no es consecuencia de los pensamientos, en tanto que pensamientos, si no fuera porque muchos de éstos llegan a convertirse en ejecuciones o acciones concretas desatinadas.

Este ingrediente sustancial viene reconocido por la literatura educativa de todos los tiempos, desde los griegos, quienes en su alto concepto de la educación integral comprendían un proceso de crecimiento de todas las facultades educables del ser humano.

Concepto que ya he analizado en otros trabajos (Cfr. Martin Molero 1988): **facultades intelectuales, actitudinales y de ejecución** o acción física.

Y no se puede hablar de «**educación ambiental**» sin considerar que dicho concepto es sustantivamente eso: «**educación**».

La adjetivación «**ambiental**» entraña — a mi juicio — un elemento crítico viniendo a resaltar, sobre todo, que el escenario de las acciones humanas, su habitáculo el planeta Tierra, se deteriora precisamente a causa de dichas actividades irracionales; pues, como afirma Voight (1971: 11):

*Siempre que el hombre, en el curso de su historia, intervino en la estructura viva de su ambiente, conformándolo y destruyéndolo, vulneró reiteradamente una ley que rige para él como para todo ser vivo: la ley del equilibrio.*

## 9. Conclusiones

Antes de entrar en el tema, es conveniente hacer una evaluación de la tecnología de incineración de residuos la cual se desarrolló como una alternativa al depósito en vertederos, especialmente en los países con poca disponibilidad de suelo, y como un modo de transformar profundamente aquellos materiales que suponen un riesgo inminente para la salud humana. Cuando las condiciones de combustión eran muy deficientes y no existían sistemas de depuración, los gases de escape se caracterizaban por su gran opacidad y por la elevada concentración de una gran variedad de contaminantes. Fue necesario incorporar técnicas de depuración, electrofiltros, capaces retener partículas y mejorar las condiciones de combustión. Posteriormente se instalaron equipos para obtener energía a partir de los gases de combustión. Al identificarse la presencia de dioxinas en las proximidades de las incineradoras de residuos urbanos y demostrarse la relación de causa a efecto, se implantó una severa legislación destinada a proteger el ambiente de los distintos contaminantes que podían formarse a partir de la gran cantidad de elementos químicos que forman parte de los residuos. Cuando se implantaron estas medidas

protectoras ya se había generalizado el rechazo por este modo de gestionar los residuos.

Independientemente de las mejoras ambientales que se han ido incorporando en las últimas décadas, se sigue considerando a la incineración una práctica poco respetuosa con el ambiente y competidora con la prevención y el reciclado de residuos.

La evaluación del proceso de incineración debe basarse en una serie de criterios, a ser posible cuantificables, que tengan en cuenta factores ambientales, económicos y sociales.

En la incineración se reduce el volumen y el peso de los residuos. Por ejemplo, en una incineradora que procesa residuos sólidos urbanos, cuando se ha realizado previamente la recogida selectiva y/o se han separado los componentes reciclables, la reducción de volumen es del orden del 90-95%. La cantidad de escorias oscila entre el 3-6 %, y la de cenizas volantes, entre el 3-10% dependiendo del método de depuración empleado (los métodos secos o semisecos originan mayor cantidad de cenizas que los métodos húmedos).

La conversión en energía eléctrica con respecto al poder calorífico inferior varía entre 20 y 30 %. Debido a las pérdidas en los gases de escape —por radiación, en cenizas y escorias— la energía térmica disponible es del 75% de la energía introducida. La transformación de esta energía térmica en energía eléctrica tiene un rendimiento del 30% debido principalmente al vapor de escape de turbina a condensador. Por tanto, se puede aprovechar la energía contenida en los residuos lo que contribuye a disminuir el consumo de combustibles, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero pero debe considerarse un proceso de valorización energética poco eficiente.

Los costos de depuración son muy elevados debido al gran volumen de gases de combustión y a las exigencias de la normativa legal. La combustión se realiza con gran exceso de aire lo que hace, además de disminuir la eficiencia energética, aumentar el volumen de los gases a depurar. Las elevadas temperaturas de operación favorecen la formación de algunos contaminantes y la volatilización de metales. Se forman dioxinas y furanos, que son contaminantes BTPs, y deben aplicarse procedimientos de

depuración muy eficaces para evitar su salida al medio. Esta elevada eficiencia de retención de contaminantes hace que la contribución de las incineradoras a la contaminación de fondo sea pequeña. La ocupación de espacio es pequeña y el emplazamiento no depende de las condiciones del subsuelo. Con la experiencia acumulada en la operación con estas instalaciones se puede aceptar que la incineración es una técnica fiable y de alta disponibilidad.

La valoración y cuantificación de estas y de otras características del proceso de incineración, y su comparación con las de los procedimientos alternativos, debe ser el procedimiento para seleccionar el método a emplear en la gestión integral de los residuos. <sup>1</sup>

A pesar de sus seguidores y detractores se prevé una expansión del sector de incineración de **RSU** en Europa durante los próximos 10-15 años, mientras se buscan alternativas para la gestión de los residuos que no se depositen en los vertederos como consecuencia de la aplicación de la Directiva sobre Vertederos, y tanto los Estados Miembros existentes como los nuevos examinan y ponen en práctica sus estrategias de gestión de residuos a la luz de esta legislación.

### ¿Cuáles son las ventajas de la incineración de los residuos sólidos?

- Reducción drástica del volumen a ser descartado: la incineración deja como sobras las cenizas, que generalmente son inertes. De esta forma, reduce la necesidad de espacio para el relleno sanitario.
- Reducción del impacto ambiental: en comparación con el relleno sanitario, la incineración minimiza la preocupación a largo plazo relacionada con el monitoreo de la capa freática, ya que el residuo tóxico es destruido, y no «guardado».
- Desintoxicación: la incineración destruye bacterias, virus y compuestos orgánicos, como el tetracloruro de carbono, el aceite sucio, e inclusive, dioxinas. En la incineración, la dificultad de destrucción no depende de la peligrosidad del residuo, sino de su resistencia al calor. La incineración también se puede usar para descontaminar el suelo que contiene residuos tóxicos. Este, después de incinerado, es devuelto a su lugar de origen;
- recuperación de energía: parte de la energía consumida puede recuperarse para la generación de vapor o electricidad.

## ¿Cuáles son las desventajas de la incineración de RSU?

- Costo elevado: la incineración es uno de los tratamientos de residuos que presenta costos elevados tanto en la inversión inicial, como en el costo operacional. Normalmente, se debe incinerar sólo lo que no puede ser reciclado. Hoy, con las crecientes exigencias para la mitigación de los impactos ambientales causados por los rellenos sanitarios, estos están llegando a costar más de U\$S 20 por tonelada, alcanzando el rango de costo operacional de los incineradores.

| Costo (rangos típicos)  |
|---|
| Inicial (instalado) = U\$S 80.000 a 130.000 por tonelada día de capacidad incineradores menores o mayores el costo varía según la tecnología escogida |
| Costo por tonelada: U\$S 20 a U\$S 60/t Residuos No Peligrosos<br>U\$S 400 a U\$S 1.000/t Residuos Peligrosos   |

- Exige mano de obra calificada: es difícil encontrar y mantener personal bien calificado para la supervisión y operación de los incineradores.
- Problemas operacionales: la variabilidad de la composición de los residuos puede causar problemas de manejo y de operación del incinerador, e inclusive exigir un mantenimiento más intenso.
- Límite de emisiones de componentes de la clase de las dioxinas y furanos: no existe consenso en cuanto al límite de emisión de los incineradores.

## ¿Incinerar o no incinerar?

Independientemente de las ventajas técnicas o incluso medioambientales que puedan presentar, las incineraciones tienen efectos negativos para el medio ambiente: además del desprendimiento de energía en forma de calor y la formación de residuos inquemados, se pueden producir partículas, óxidos de azufre, carbono y nitrógeno, diversos hidrocarburos y otros compuestos; entre estas sustancias existen varias extremadamente peligrosas para el hombre y para el medio ambiente.

Frecuentemente, cuando se estiman los costes de instalación y puesta en funcionamiento de una incineradora, no se consideran los costes ambientales. Resulta, como poco, curioso el que, como la puesta en marcha de una planta incineradora no es un proyecto en el que los costes de explotación, con los precios actuales de la energía, sean positivos (los gastos en mantenimiento, amortizaciones, personal, gestión, etc., son mayores que los ingresos) haya que acudir a las necesidades sociales (se presta un servicio, que es la eliminación de residuos) como razón para la

instalación de plantas incineradoras. Aun así, el punto fuerte de esta alternativa está en la posibilidad de recuperar la energía térmica de la combustión.

La decisión entre incinerar o no, debe tomarse tras sopesar las consecuencias ambientales de llevar a cabo o no el proceso.

Así, por ejemplo, cuando se trata de hallar la forma menos dañina de eliminar residuos sólidos urbanos se deberá comparar entre las consecuencias de los vertidos directos o los indirectos de distintos tipos (controlado anaeróbico, controlado anaeróbico de alta densidad, controlado aeróbico convencional o aeróbico con trituración previa), con los efectos de la incineración o de otros procesos alternativos o complementarios, cuando sean posibles (principalmente, reciclado o/y compostaje). Este paso previo es complejo, por la gran cantidad de efectos a considerar (contaminación atmosférica; de las aguas superficiales, de infiltración y subterráneas; alteraciones locales de flora y fauna y proliferación de roedores, insectos y otros animales indeseables; deterioro de valores estéticos y paisajísticos; ocupación e inutilización del suelo, etc.) y por la necesidad de tener presentes diversos factores técnicos complementarios (minimización de impactos, drenaje de líquidos, filtrado y control de desplazamientos de gases, impermeabilizaciones, acondicionamiento de perímetros y tratamientos de lixiviados de vertederos, etc.).

Si, además, se considera que alrededor de una tercera parte de los vertidos se realiza de forma incontrolada, con graves efectos ambientales, la eliminación de la basura en la actualidad es uno de los problemas prioritarios con los que se encuentran los municipios y comunidades autónomas, presionados por la necesidad de adoptar medidas de tratamiento y con dificultades para encontrar terrenos para los vertidos, particularmente en zonas densamente pobladas.

Los costos ambientales de la incineradoras son importantes, pero en la mayoría de los casos suelen resultar considerablemente menores que los de los vertidos.

Las tecnologías de incineración han evolucionado hasta un estado en el que existe una abundante oferta de equipos que garantizan una correcta incineración de los residuos, equipos que se complementan con otros de tratamientos de gases que garantizan las emisiones de acuerdo con las normativas más estrictas, para evitar en lo posible la contaminación atmosférica. Existen tres tipos principales de técnicas de limpieza de los gases emitidos por las incineradoras, una vez filtrados (o limpiados mediante precipitadores electrostáticos): seco (se añade un reactivo seco y

el producto final es un polvo seco), semi-seco (el producto es añadido en forma de una pasta y se obtiene un polvo seco) y húmedo (el gas, enfriado, es lavado y neutralizado con agua y sosa u otra solución análoga), pero en todos los casos se generan residuos problemáticos. En resumen, los costes ambientales dependientes de la tecnología de incineración (incineradores cíclicos o de alimentación continua; y, en este último caso, pueden ser convencionales, en lecho fluido, por infrarrojos, etc.) pueden minimizarse mediante un control adecuado de la combustión y sus productos.

La heterogeneidad, causante del aumento de diversidad de los efectos deletéreos sobre el medio ambiente, puede hacer necesaria una preclasificación, para separar el material que será encaminado a la incineradora de la que tendrá otros destinos (compostaje, reciclado, vertido de inertes).

En el caso de residuos sólidos urbanos, probablemente y al menos para grandes volúmenes, el método más aconsejable sea el reciclado y compostaje de los residuos que lo permitan, acompañado por la incineración de los rechazos que necesariamente se producen tras esta primera fase y el inevitable vertedero de apoyo para las cenizas y basuras que no se pueden reciclar, fermentar o quemar.

Mención aparte merece el carácter mutagénico (y por tanto, suele considerarse, cancerígeno) de algunas sustancias derivadas de las combustiones. La sociedad tecnológica y de consumo ha hecho y está haciendo aumentar la cantidad de tales sustancias hasta concentraciones que pueden ser muy peligrosas. Existe un explicable rechazo social hacia instalaciones como las incineradoras, que pueden ser un mal necesario, pero no hacia conductas y actitudes que son precisamente las que hacen necesario aquel mal (o, al menos, lo hacen crecer desmesuradamente).<sup>2</sup>

Los residuos y su gestión son un aspecto medioambiental significativo. El tratamiento térmico de residuos puede, por tanto, verse como una respuesta a las amenazas medioambientales planteadas por corrientes de residuos mal gestionadas o sin gestionar.

El objetivo del tratamiento térmico es proporcionar una reducción global de impacto ambiental que, de otro modo, podría derivarse de los residuos. No obstante, en el curso del funcionamiento de instalaciones de incineración se generan emisiones y consumos cuya existencia y magnitud se ve influenciada por el diseño y el funcionamiento de la instalación.

Los posibles impactos de las instalaciones de incineración de residuos en sí se engloban en las siguientes categorías:

- Emisiones globales del proceso a la atmósfera y al agua (incluido olor).
- Producción global de residuos del proceso.
- Ruido y vibración del proceso.
- Consumo y producción de energía.
- Consumo de materias primas (reactivos).
- Emisiones fugitivas –principalmente del almacenamiento de residuos.
- Reducción de los riesgos de almacenamiento/manejo/proceso de residuos peligrosos.

Otros impactos que caen fuera del ámbito de este documento BREF (pero que pueden tener un impacto significativo sobre toda la cadena de gestión de residuos) se derivan de las siguientes operaciones:

- Transporte de los residuos entrantes y de los residuos de salida;
- Pretratamiento amplio de residuos (ej.: preparación de combustibles derivados de residuos).

La aplicación y entrada en vigor de modernas normativas sobre emisiones, así como el uso de modernas tecnologías de control de la contaminación, han reducido las emisiones a la atmósfera a niveles en los cuales los riesgos contaminantes de las incineradoras de residuos se consideran por lo general muy bajos. El uso continuado y eficaz de dichas técnicas para controlar las emisiones a la atmósfera representa un aspecto medioambiental clave.

Además de su papel para asegurar un tratamiento eficaz de residuos sin gestionar, potencialmente contaminantes, muchas instalaciones de incineración de residuos tienen un papel particular como procesos de recuperación de energía a partir de residuos.

En los lugares donde se han aplicado políticas para aumentar la capacidad de las instalaciones (generalmente municipales) de incineración de residuos para valorizar los residuos, esto aumenta la explotación de esta contribución medioambiental positiva.<sup>3</sup>

Por lo tanto, una oportunidad medioambiental significativa para el sector es incrementar su potencial como proveedor de energía.

<sup>1</sup>La incineradora de residuos: ¿Está justificado el rechazo social? Arturo Romero Salvador

<sup>2</sup>Impacto ambiental de las incineradoras. José Antonio Saiz de Omeñaca y Jesús Saiz de Omeñaca

<sup>3</sup> Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC) “Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos” - Documento BREF

Luego de presentadas las conclusiones anteriores las cuales fueron el producto de un arduo trabajo de investigación, indagación y selección, tratando de presentar aquellas que evidencian el mayor grado de objetividad y contenido técnico.

A los efectos de cerrar el tema se propone la siguiente conclusión personal, pero previamente definiremos el concepto de **MTD**.

Se define el término «**Mejores Técnicas Disponibles**» **MTD** como «la fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir en general las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente».

A continuación la siguiente aclaración adicional de la citada definición:

«**Mejores**»: las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto;

«**Técnicas**»: la tecnología utilizada junto con la forma en que la instalación se diseña, construye, mantiene, explota y paraliza.

«**Disponibles**»: las técnicas desarrolladas a una escala que permita su aplicación en el contexto del sector industrial correspondiente, en condiciones económica y técnicamente viables, tomando en consideración los costes y los beneficios.<sup>3</sup>

El empleo de una tecnología debe ser cuidadosamente estudiada, preferentemente una **MTD**, asociada a su empleo se deben realizar las evaluaciones ambientales de rigor, la incineración puede ser una técnica de complementación si los **RSU** son segregados y posicionados de manera tal que la fase a quemar sea metano gaseoso, con exhaustivo monitoreo de las emisiones.

No existe la metodología perfecta, pero entendemos que la combinatoria de soluciones potencian las ventajas de las mismas y por último la selección basada en el correspondiente estudio **Riesgo** vs. **Beneficio** resulta aceptable como inicio de la solución.

---

<sup>3</sup> Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC) “Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos” - Documento BREF

## 10. Consideraciones para futuras investigaciones

El tema abordado, es un disparador para futuras investigaciones, tal como se mencionara en el punto anterior, el concepto de **MTD** puede tratarse en toda su extensión.

A continuación profundizaremos los temas o ítems que pueden o deberían abordarse en futuras investigaciones:

*La finalidad práctica es por consiguiente la optimización local de las circunstancias de la instalación, teniendo en cuenta las **MTD** y otros factores locales.*

*Para incineración de residuos, los factores locales a tener en consideración pueden, entre otros, incluir de forma general:*

*Motivaciones ambientales locales, como la calidad del entorno, pueden influenciar el comportamiento local requerido con respecto a emisiones de la Instalación, o disponibilidad de determinados recursos.*

*La naturaleza particular de los residuos que se producen localmente y el impacto de la infraestructura de gestión de residuos sobre el tipo de residuos que llegan a la instalación.*

*El costo y la posibilidad técnica de aplicar una técnica particular en relación con sus posibles ventajas: esto es de particular relevancia a la hora de considerar la eficacia de las instalaciones existentes.*

*La disponibilidad, grado de utilización y precio de opciones para la recuperación/eliminación de los residuos finales producidos en la instalación.*

*La disponibilidad y precio obtenido por la recuperación de energía.*

*Los factores locales de tipo económico, comercial o político que pueden influir sobre la tolerabilidad de las tasas de reciclaje que pueden acompañar la adición de ciertas opciones tecnológicas.*

*Por consiguiente, en combinación con las **MTD** específicas para corrientes residuales, para poder obtener niveles de eficacia ambiental generalmente compatibles con las **MTD**, en general se considera **MTD** para incineración de residuos:*

*1. La selección de un diseño de instalación adecuado a las características de los residuos recibidos.*

*2. El mantenimiento de la instalación en un estado generalmente ordenado y limpio.*

3. Mantener todo el equipo en buen estado de funcionamiento y realizar inspecciones de mantenimiento y mantenimiento preventivo para conseguirlo.

4. Establecer y mantener controles de calidad sobre la entrada de residuos, según los tipos de residuos que se reciban en la instalación, decir:

a. Establecimiento de limitaciones de entrada a la instalación e identificación de los riesgos claves.

b. Comunicación con proveedores de residuos para mejorar el control de calidad de los residuos entrantes.

c. Control de la calidad de la alimentación de residuos al incinerador.

d. Inspección, muestreo y prueba de los residuos entrantes.

e. Detectores de materiales radiactivos.

A los efectos de precisar los posibles temas de investigación se propone: **“Configuraciones especiales de ciclo de agua/vapor con centrales de energía externas”**

#### **A. Descripción**

Debido a la naturaleza corrosiva de los gases de combustión, la eficiencia de la producción de electricidad de la incineración de residuos urbanos está limitada por la temperatura máxima aceptable de los materiales de los tubos de la caldera y por la correspondiente temperatura máxima del vapor.

Sin el uso de materiales especiales para proteger los tubos de la caldera de la corrosión, los parámetros del vapor en las plantas incineradoras de residuos no suelen superar los 40 bares y 400 °C.

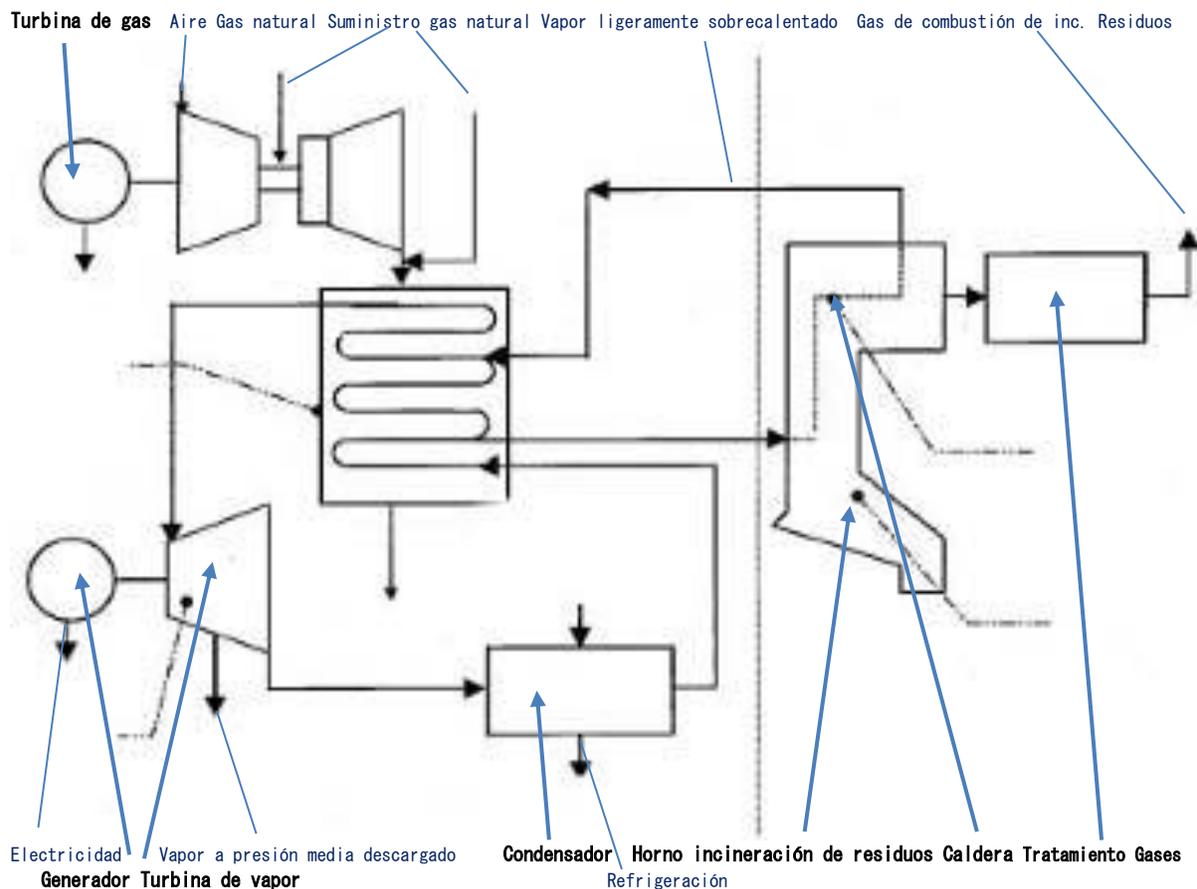
En plantas de residuos peligrosos (donde la carga de cloruros, etc. en el gas crudo es mayor), se utilizan temperaturas y presiones más bajas (ej.: 30 bares y 280 °C) a fin de evitar velocidades de corrosión excesivas y los consiguientes costes elevados de mantenimiento. La adopción de parámetros de vapor más elevados permite transferir más calor al medio a una temperatura más alta. Por consiguiente, la eficiencia termodinámica aumenta, y con ella la producción eléctrica por tonelada de residuos incinerados. No obstante, los costos de los materiales requeridos para proteger los tubos de la caldera son generalmente significativos en relación a los ingresos a percibir de las ventas de electricidad adicionales.

Una opción que evita altas temperaturas de los materiales de los tubos de la caldera es el sobrecalentamiento del vapor usando gases de combustión limpios, que contienen mucho menos cloro: Esto es posible si la planta incineradora de residuos urbanos puede combinarse con una central de energía de suficiente capacidad.

*Ejemplo: Planta incineradora de residuos urbanos, AZN Moerdijk, N*

*Esta planta de incineración de residuos se combina con una central de ciclo combinado a gas natural, como se muestra arriba. Se suministra vapor a 100 bares, ligeramente sobrecalentado a 400 °C, a las calderas de recuperación de la planta de turbinas de gas, donde se sobrecalienta a unos 545 °C.*

*Tanto la planta de incineración de residuos urbanos como la central de energía a gas tienen tres líneas separadas.*



(Fuente: “Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos” - Documento BREF)

*El diseño del esquema combinado de ambas plantas permite la operación independiente de todas las líneas de incineración y de turbinas de gas aunque, en estas circunstancias, a una menor eficiencia energética.*

*Beneficios medioambientales que se consiguen*

*Mejora de la eficiencia energética general mediante el suministro de calor a un usuario sinérgico.*



*planta incineradora estaban operativas de forma simultánea, la combinación no se consideró rentable en ese momento.*

*Beneficios medioambientales que se consiguen*

*Mejora de la eficiencia energética general mediante el suministro de calor a un usuario sinérgico.*

*Datos operativos*

*Con estos tipos de configuraciones, el proceso de incineración no necesita adoptar elevadas temperaturas de vapor y por lo tanto evita la corrosión y la pérdida de operatividad. No obstante, a veces la presión puede aumentarse para aprovechar más la integración. En tales casos, la mayor temperatura del vapor en el evaporador puede producir costes de mantenimiento adicionales. Por ejemplo, a 40 bares la temperatura de saturación es de 250 °C, y a 100 bares de 311 °C, una diferencia de 61 °C. Nótese que los mecanismos de corrosión aumentan exponencialmente con la temperatura externa en las paredes de tubos de la caldera al entrar en contacto con los gases de combustión.*

*Aplicabilidad*

*Sólo aplicable cuando haya una operación sinérgico convenientemente situada y se hayan suscrito los correspondientes contratos comerciales.*

*Aplicable principalmente cuando el objetivo de la recuperación de energía sea la producción de electricidad. Menos aplicable a plantas que puedan suministrar vapor o calor directamente a un usuario.*

*La eficiencia energética sólo se incrementará cuando el usuario tenga una demanda consistente y aproveche de forma consistente la energía suministrada.*

*Economía*

*Los altos precios de la electricidad promueven la adopción de técnicas que aumenten la eficiencia de generación de electricidad.*

*En este caso, esto tiene el impacto de aumentar el valor relativo del vapor/calor suministrado por la incineradora a la central eléctrica adyacente.*

*Motivo principal de aplicación*

*La integración del suministro de energía con un usuario externo aumenta las opciones de uso de la energía derivada de los residuos.*

*Dado que la cogeneración y el suministro de vapor/calor ofrecen generalmente la mejor oportunidad para aumentar los índices de recuperación de energía, las políticas que afectan a la disponibilidad de clientes adecuados para vapor/calor juegan normalmente un papel bastante*

más importante en la determinación de la eficacia alcanzable en una instalación que los detalles sobre su diseño. Por motivos principalmente estratégicos y económicos, la producción y suministro de electricidad suele ser la opción de recuperación de energía escogida en instalaciones individuales. Las opciones de cogeneración, calefacción centralizada y suministro de vapor industrial sólo están bien explotadas en unos pocos Estados Miembros europeos –generalmente los que tienen los precios energéticos más elevados o han adoptado políticas particulares–.

El suministro de energía para el funcionamiento de sistemas de refrigeración y plantas de desalinización es algo que se hace, aunque en general está mal explotado –se trata de una opción que puede ser de particular interés en zonas con climas más cálidos, y en general amplía las opciones para el suministro de energía derivada de residuos–.<sup>1</sup>

***El incremento de la eficiencia del ciclo térmico se constituye en una interesante propuesta para futuras investigaciones.***

## 11. Conclusiones personales

A modo de conclusión personal, consignaremos la experiencia vivida por el autor en su carrera profesional.

Recibido de ingeniero químico trabaja por espacio de diez años (1984 a 1994), en una importante factoría de pasta de papel (pastera) de fibra larga cuya planta fabril está localizada en Misiones específicamente en la localidad de Puerto Esperanza a 50 km de Puerto Iguazú.

Siendo asignado a la Superintendencia de Servicios y Utilidades, la función desempeñada a excepción del período que se desempeñó como Jefe de Fábrica, fue la de ingeniero de procesos del área.

La posición reportaba directamente al Jefe de Área, y la función específica el seguimiento y optimización de los procesos de la usina con fuerte incidencia en la producción del complejo industrial (ciclo de recuperación planta de evaporación y caldera de recuperación).

El proceso Kraft, a través del cual se obtiene pasta blanqueada de fibra larga, genera emisiones ambientales, las cuales detallaremos:

*Emisión de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> y material particulado.*

*Olores (TRS)*

*Significativas cantidades de CO<sub>2</sub>*

A los efectos de ubicarnos en el tema, el reactivo de pulpado es decir a través del cual se separa la celulosa de la lignina es una mezcla de

hidróxido de sodio y sulfuro de sodio ( $\text{NaOH}$  /  $\text{SNa}_2$ ), denominado comúnmente “licor blanco”.

Luego de una cocción a  $150 - 170\text{ }^\circ\text{C}$ , por espacio de 1 - 2 horas, se deben efectuar las tapas de: Enfriamiento y Soplado. Lavado donde se separan las fibras que se conducen a la etapa de Blanqueo y el licor residual “licor negro” que se envía a Recuperación, en donde es sometido a las siguientes etapas:

- Expansión del licor (Gases que deben ser condensados).
- Evaporación del licor hasta 65 % - 85 % de concentración.



Evaporación (Veracel, Brasil 2005)

- Combustión del licor negro en la caldera de recuperación



Caldera en construcción

(Fuente: Fábrica de Pasta de Papel Botnia - Fray Bentos)



Quemador

<sup>1</sup> Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC) “Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos” - Documento BREF

Las emisiones gaseosas del pulpado reconocen las siguientes fuentes principales:

### ***Caldera de recuperación***

#### ***Disolución de las cenizas de esa caldera***

Horno de cal

Apagado de la cal

Es importantes destacar que los ***gases olorosos TRS (Sulfhídrico y Mercaptanos) debían ser captados y quemados***, lo cual se materializaba a través de una cañería que conducía a los mismos desde digestión al horno de cal (el seguimiento y la reformulación ingenieril completa estaba a cargo de un grupo específico de profesionales al cual yo pertenecí).

Un aspecto a destacar son las ***dioxinas*** los cuales son compuestos hidrofóbicos de muy baja solubilidad y por lo tanto muchas veces no se detectan en los efluentes líquidos. Se detectan más fácilmente en los barros y en cenizas de combustión.

En general son fuentes de dioxinas los procesos químicos con presencia de fenoles y cloro y las combustiones en presencia de cloro. <sup>1</sup>

Si bien se afirmaba que la emisión de dioxinas en las calderas de recuperación kraft es un valor muy bajo en comparación a la generada por la combustión incontrolada, el factor acumulativo en la atmósfera es relevante.

Después de esta introducción, como se señalara que dentro de las misiones y funciones específicas, se encontraban entre otras: a. Seguimiento y optimización del rendimiento de la caldera de recuperación. b. Monitoreo de los gases de chimenea.

Es importante destacar el año y las circunstancias bajo la cual se realiza el mismo. Las mediciones comenzaron a partir de 1986, la caldera no estaba instrumentada en cuanto a mediciones ambientales y no se conocía a ciencia cierta el nivel base de la misma dado que por el ritmo de producción de la factoría, la caldera trabajaba con sobrecarga másica y térmica (15 y 9% respectivamente).

Para este fin se contrata a personal del INTI, quienes secundados por personal de plantas en calidad de soporte técnico, dado los conocimientos técnicos y de posicionamiento se formaron parte del equipo de trabajo.

Las mediciones realizadas con equipamiento específico consistieron básicamente en: a. Caudales b. Partículas PM10 y totales. c. SO<sub>2</sub> d. NO<sub>x</sub> e. TRS y CO / CO<sub>2</sub>.

Las cuales actualmente en las instalaciones con la última tecnología disponible son mediciones continuas de los gases de chimenea ver foto.

Otro aspecto importante en la actualidad son las estaciones de monitoreo externas es decir fuera de la planta para TRS, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Partículas (PM10 y totales), Ozono O<sub>3</sub> a 1 o 3 km en dirección predominante de los vientos o en la posición donde se espera la mayor concentración de contaminantes y convenientemente operadas por un organismo externo a la empresa.



Base de la chimenea caldera de recuperación Botnia - Fray Bentos

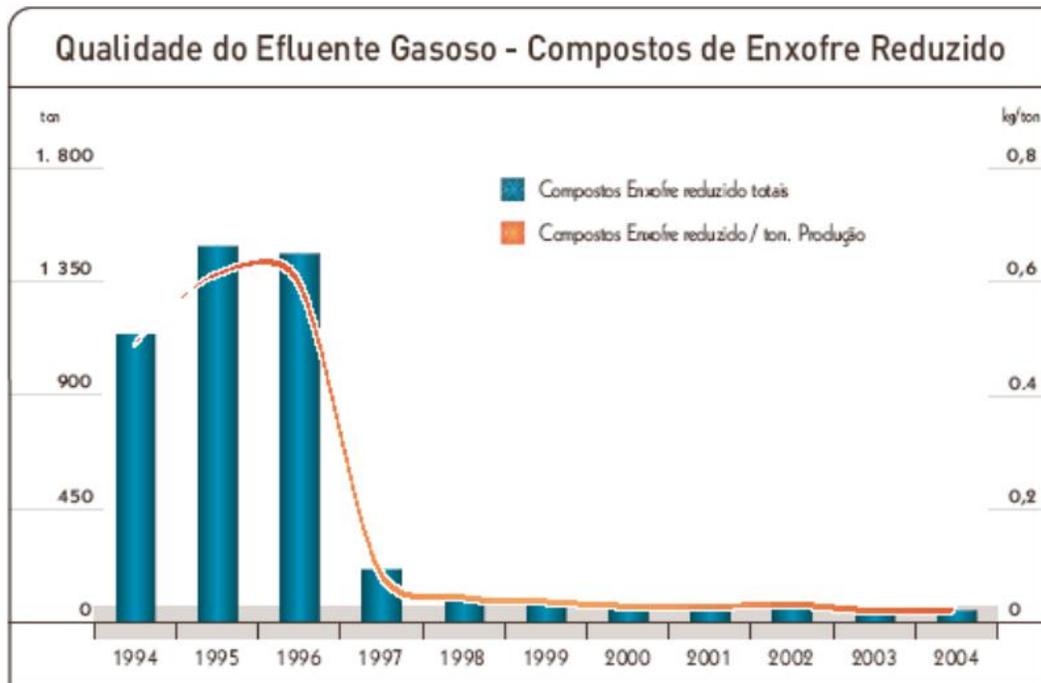
Volviendo a lo nuestro el trabajo de muestreo llevó tanto su tiempo de planeamiento como de ejecución, el informe final con las conclusiones y recomendaciones fueron entregados a posteriori a la dirección de la empresa, sin tener los participantes conocimiento del mismo.

El interés por estos muestreos se intensificó con las realizaciones de varias campañas posteriores y la adquisición de equipamiento propio de última generación, la mejor tecnología disponible en ese momento en plaza, para lo cual personal de la instalación fue capacitado y entrenado para su uso por personal del INTI.

La etapa comprendió también mediciones conjuntas de inter comparación, a esta altura de los acontecimientos los datos y conclusiones eran de público conocimiento dentro del grupo de trabajo y de las Jefaturas de Áreas respectivas.

Es muy importante el siguiente gráfico donde se muestra el interés por el monitoreo ambiental, a la par de la implementación de acciones concretas y efectivas lo cual redundó en la consecuente disminución de los valores de TRS.

FIGURA 62



Universo CELPA

A modo de conclusión final la experiencia fue muy enriquecedora, la voluntad de medir y el posterior involucramiento, puso de manifiesto una actitud que fue tomando forma, lo que es hoy el cuidado ambiental, nadie lo debería cuestionar ni menos ponerlo en duda.

Antes de cerrar el apartado es valioso exponer un párrafo extraído del Informe realizado por la Alianza Global para Alternativas a la Incineración/ Alianza Global Anti Incineración (GAIA) 2003, referido a la “Producción Limpia”.

**La Producción Limpia** es un enfoque para el rediseño industrial, que busca eliminar los productos secundarios peligrosos, reducir la contaminación en su conjunto, y crear productos, y consecuentes residuos, que sean seguros dentro de los ciclos ecológicos. Los principios de la Producción Limpia son:

- el Principio Precautorio, que aboga por la precaución ante la incertidumbre científica

- el *Principio Preventivo*, que sostiene que es mejor prevenir el daño antes que remediarlo
- el *Principio Democrático*, bajo el cual todos aquellos que puedan verse afectados por una decisión tienen derecho a participar del proceso de toma de decisión
- y el *Principio Holístico*, que busca un enfoque que tome en consideración el ciclo de vida integral para la toma de decisiones ambientales.

*Hay tecnologías en aplicación, como las centrales nucleares cuyo impacto ambiental puede ser harto significativo, considerar que hay 442 reactores actualmente en operación en un total de 31 países, las producen alrededor del 11% de la electricidad mundial.*

*Hago propio un principio básico extraído de dicha tecnología: **“El cuidado ambiental debe ir de la mano desde la concepción del proyecto, durante su construcción, operación fabril y posterior desmantelamiento, con el debido tratamiento y disposición de los pasivos ambientales”.***

<sup>1</sup>Las industrias pasteras y sus emisiones. Miguel Zanuttini ITC – FIQ – UNL CONICET 9° Foro de Ciencias - Feria del Libro Buenos Aires - 30 de abril 2008

## 12. Bibliografía / Fuentes

<http://www2.cedom.gov.ar/es/legislacion/normas/leyes/ley1854.html> La Ley 5.966 se encuentra siendo revisada en la Justicia, pero en la actualidad está en plena vigencia

Ambientum (s.f.) Características físicas de los residuos sólidos urbanos.

Castells, X. E. (2005) Tratamiento y valorización energética de residuos. Ediciones Díaz de Santos.

Fernández, A. (2007) Planta de incineración de residuos sólidos urbanos con tecnología de parrilla y recuperación energética. Ingeniero Industrial, Universidad Pontificia Comillas, 2007.

fernandezdiez.es, XXVII.- Recuperación de productos y calor en la industria papelera, Centrales Térmicas

Informe realizado por la Alianza Global para Alternativas a la Incineración/ Alianza Global Anti Incineración (GAIA) 2003.

Ley de la Provincia de Buenos Aires 13.592, artículo 6.

Poletto, J. A. & da Silva, C. L. (2009) Influencia de la Separación de Residuos Sólidos Urbanos para Reciclaje en el Proceso de Incineración con Generación de Energía. (Spanish). Influence of the Separation of Municipal Solid Wastes to Recycling in the Incineration Process with Energy Generation. (English), 20, 105-112.

Papa Francisco. Encíclica Laudato Si' "El cuidado de la casa común", 2015

Romero Salvador, Arturo, La incineradora de residuos: ¿Está justificado el rechazo social?

Saiz de Omeñaca, José Antonio y Saiz de Omeñaca, Jesús Impacto ambiental de las incineradoras.

Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC) "Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos" - Documento BREF

Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S. (1994) Gestión integral de residuos sólidos. McGraw-Hill.

Zanuttini, Miguel Las industrias pasteras y sus emisiones. ITC – FIQ – UNL  
CONICET 9° Foro de Ciencias - Feria del Libro Buenos Aires - 30 de abril  
2008.