

Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía

Converting Municipal Solid Waste into energy

Diego Moratorio¹, Ignacio Rocco^{2*}, Marcelo Castelli³

Recibido: Mayo 2012

Aprobado: Agosto 2012

Resumen.- Ante la situación energética del Uruguay, donde sus principales fuentes energéticas son a través de centrales hidráulicas y centrales térmicas a partir de combustibles fósiles, es importante considerar otras fuentes de energía como ser el recurso energético de los residuos. Recuperación de Energía de los Residuos o Waste-to-Energy (WTE), por su sigla en inglés, es un sistema de gestión para la disposición de los residuos sólidos urbanos (MSW, Municipal Solid Waste) que permite un uso adecuado y sostenible de los residuos que no pueden ser eficientemente reciclados o reutilizados. El presente artículo presenta las diferentes alternativas existentes para generar energía a partir de residuos y propone un caso concreto de aplicación de pequeña escala, utilizando un Sistema de Oxidación por Batch para la ciudad de Paysandú, Uruguay.

Palabras clave: Energía de los residuos; Energía renovable; Residuos Sólidos; Urbanos; Gasificador; Sistema de oxidación por batch.

Summary.- Given Uruguay's energetic situation, where its main energy sources are from hydroelectric and thermal power from fossil fuels, it is important to consider other energy sources such as Energy from Waste. Waste to Energy (WTE) or Energy from Waste is a Municipal Solid Waste (MSW) management system, which results in an appropriate and sustainable use of the waste which cannot be efficiently recycled or reused. This article overviews the different WTE alternatives and proposes a concrete small-scale application for the city of Paysandú.

Keywords: Waste to Energy; Renewable Energy; Municipal Solid Waste; Gasification; Batch Oxidation System.

1. Introducción.- Los Residuos Sólidos Urbanos o MSW (por su sigla en inglés: Municipal Solid Waste), refieren principalmente a los materiales desechados por los domicilios, pero también incluye algunos desechos comerciales e industriales que son de similar naturaleza y que son depositados en un vertedero municipal. Los MSW contienen una fracción significativa de papel, desechos alimenticios, madera y recortes de poda, algodón y cuero, metales y vidrios, como también derivados del petróleo como plásticos, gomas y telas sintéticas [1].

Existen diferentes interpretaciones en cuanto a la clasificación de los MSW como fuente de energía renovable. La Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (EPA) considera los MSW como una fuente de energía renovable, ya que si no se les da un uso secundario a los mismos (como ser el aprovechamiento energético), estos serán enviados a rellenos sanitarios (desaprovechando su poder energético). Por otro lado el Departamento de Energía de los EE.UU. incluye a los MSW como fuente renovable de energía, siempre y cuando el contenido calórico del combustible provenga principalmente de materiales biológicos [1, 2]. Actualmente las

¹ Ing. Ind. Diego Moratorio ; Universidad de Montevideo ; dmoratorio@um.edu.uy

² Ing. Ind. Ignacio Rocco ; Universidad de Montevideo ; irocco@um.edu.uy

³ Dr. Ing. Marcelo Castelli ; Universidad de Montevideo ; mcastelli@um.edu.uy

* los dos primeros autores contribuyeron de igual manera al trabajo

políticas europeas establecen las siguientes prioridades para la prevención y tratamiento de residuos [3] :



Figura XI: Prioridades para la prevención y tratamiento de residuos [4].

La Comisión Europea para el Medio Ambiente plantea una jerarquía en cuanto a la gestión de residuos. En primera instancia busca reducir la generación de residuos en la fuente. Una vez generados los residuos, las comunidades deben tratar de reciclar la mayor cantidad de materiales posibles. Sólo cuando los materiales no puedan ser reciclados, ya sea porque la población no los clasifica en su hogar (clasificación en la fuente) o porque no existe un uso secundario para estos materiales, se considera como mejor opción alguna estrategia de recuperación de los residuos y, como opción menos deseada, la disposición final en vertederos [1].

Profundizando en los métodos de gestión de residuos se plantean, en la Figura II, las diferentes alternativas para la recuperación de los residuos. Dentro de lo que es “recuperación”, las soluciones más deseables son: la digestión anaerobia y el compostaje aerobio, aunque esto sólo es posible si los residuos orgánicos han sido separados en la fuente. Luego se encuentran las tecnologías para conversión de residuos en energía. Estas pueden darse de diferentes formas, como ser: la incineración directa, la gasificación y combustión.

Dentro de los métodos de disposición final en vertederos, se encuentran los rellenos sanitarios que capturan el metano, y lo utilizan para generar energía eléctrica; luego aquellos rellenos que capturan metano pero no generan energía a partir de él, sino que simplemente lo queman en una antorcha; y finalmente, como opción menos deseada, los vertederos a cielo abierto [1].



Figura XII: Alternativas para la recuperación de residuos [4].

2. Propiedades de los residuos.- La composición de los residuos es un elemento fundamental para la selección de la mejor tecnología para la conversión de residuos en energía. Es por ello que existen diferentes normas a nivel internacional para realizar un correcto estudio de los residuos a tratar. En la siguiente Tabla se describe algunas de éstas normas [5]:

| Norma | Descripción |
|------------------------|---|
| ASTM D 5231-9 2(2003) | Metodología para la medición de la composición de MSW mediante una clasificación manual de los residuos |
| ASTM E790/830/897 | Determinación porcentual del contenido de humedad, cenizas, volátiles y carbono fijo de los residuos |
| ASTM E777/778 | Método para la determinación porcentual del contenido de carbono (C), hidrógeno (H) y nitrógeno (N). |
| ASTM E955 | Determinación del poder calorífico superior de una muestra de MSW |

Tabla III: Normas internacionales para el estudio de muestras de MSW.

2.1 Composición físico-química de los residuos.- En el caso de no poder tomar muestras de los residuos para analizarlas en un laboratorio, puede calcularse de forma aproximada la composición química de los residuos utilizando datos de composiciones físicas de los mismos [1]. A modo de ejemplo se muestra en la siguiente Tabla datos de composiciones físicas de residuos, correspondientes a la ciudad de Paysandú.

| Componente | Composición Física (% peso, base seca) | |
|------------------|---|-------------------------|
| | Medición 1 ⁴ | Medición 2 ⁵ |
| Materia orgánica | 60 % | 58 % |
| Plásticos | 18 % | 17 % |
| Cartón | 7 % | 13 % |
| Papel | 4 % | 0 % |
| Textiles | 4 % | 0 % |
| Vidrio | 3 % | 8 % |
| Metales | 0 % | 3 % |
| Otros | 4 % | 1 % |

Tabla IV: Composición física de los residuos.

Para poder calcular de forma estimada la composición química de los residuos, se utilizan tablas [6] que determinan el porcentaje de C (carbono), H (hidrógeno), O (oxígeno), N (nitrógeno), S (azufre) y cenizas, de los componentes típicos de los residuos. A modo de ejemplo se muestra la estimación de la composición química de los residuos para la Medición 1:

| Componente | Comp. Física (% peso, base seca) | Análisis último del componente (% peso, base seca) | | | | | |
|------------------|-----------------------------------|---|-----|------|-----|-----|---------|
| | | C | H | O | N | S | Cenizas |
| Materia orgánica | 60 % | 48 | 6,4 | 37,6 | 2,6 | 0,4 | 5 |
| Plásticos | 18 % | 60 | 7,2 | 22,8 | | | 10 |
| Cartón | 7 % | 44 | 5,9 | 44,6 | 0,3 | 0,2 | 5 |
| Papel | 4 % | 43,5 | 6 | 44 | 0,3 | 0,2 | 6 |
| Textiles | 4 % | 55 | 6,6 | 31,2 | 4,6 | 0,2 | 2,5 |

⁴Datos provenientes de un informe realizado por la Intendencia Municipal de Paysandú en convenio con la Universidad de la República en el año 1998 [7]

⁵Datos provenientes de un estudio publicado por la Dirección Nacional de Medio Ambiente en el año 1996 [8]

| | | | | | | | |
|-------------------------|-----|-------|------|-------|-----|------|-------|
| Vidrio | 3 % | 0,5 | 0,1 | 0,4 | | | 98,9 |
| Metales | 0 % | 4,5 | 0,6 | 4,3 | | | 90,5 |
| Otros | 4 % | 26,3 | 3 | 2 | 0,5 | 0,2 | 68 |
| Composición química MSW | | 47,68 | 6,18 | 32,88 | 1,8 | 0,28 | 11,18 |
| Humedad (%peso) | | 59 % | | | | | |

Tabla V: Composición química de los residuos.

2.2 Poder calorífico de los residuos.- Es necesario diferenciar en un combustible el poder calorífico inferior (pci) y el poder calorífico superior (pcs). La diferencia entre ambos radica básicamente en la energía asociada a la condensación del vapor de agua contenido en los gases de la combustión.

Dado que por condiciones medioambientales no se puede alcanzar una temperatura de los gases de 0 °C, donde se aprovecharía el calor de cambio de estado del agua (597 kcal / kg vapor de agua condensador), el pci tiene un significado mayor para el cálculo del potencial energético de los residuos [1].

Existen dos formas para el cálculo del pci: el método analítico y el método práctico.

El analítico consiste en sumar los poderes calóricos de los elementos principales que forman la muestra de basura, ponderados por su fracción en peso, descontando de la cantidad de hidrógeno total la que se encuentra ya combinada con el oxígeno. Para ello se utilizan los datos provistos por el análisis último. Por ejemplo, si se tiene la composición de un combustible en base seca, el pci se puede calcular de la siguiente manera [1]:

$$PCI \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right] = 8.140 \cdot C + 29.000 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2.220 \cdot S - 600 \cdot H_2O$$

El método práctico consiste en calcular el pci a partir del valor del pcs hallado mediante el ensayo de poder calorífico. Para poder hallar el pci basta con restarle el calor de cambio de estado del agua. Para ello se precisa conocer la cantidad de H del combustible (se obtiene del análisis último) y la humedad (análisis próximo). La ecuación resultante es la siguiente [1]:

$$PCI \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right] = PCS \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right] - 597 \cdot (9 \cdot H + H_2O)$$

Típicamente un valor aproximado del pci de los RSU es de 9-11 MJ/kg [9].

2.3 Potencial de generación.- De modo de aprovechar al máximo el potencial energético de los residuos, resulta conveniente aplicar la estrategia que se denomina “co-generación” en donde una parte de la energía de los residuos se aprovecha como energía térmica (generalmente a través de la generación de vapor para un proceso industrial o agua caliente para un proceso industrial o para calefacción de viviendas) y otra parte se convierte en energía eléctrica. En la Figura III, se muestran las fracciones de conversión aproximadas que pueden obtenerse en un sistema de co-generación. Observamos que un 50% de la energía química puede convertirse en energía térmica, un 30% en energía eléctrica y el 20% restante se pierde.

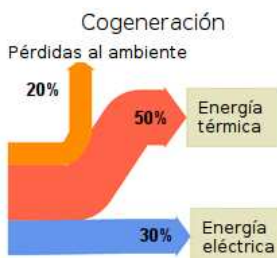


Figura XIII: Diagrama energético de un ciclo de co-generación típico Adaptado de [10].

A modo de ejemplo, si consideramos un poder calorífico de 9,25 MJ/kg de MSW y 1 ton de MSW tendríamos un potencial de generación (considerando potencia de salida uniforme a lo largo del día) de:

$$\frac{1.000\text{kg}}{\text{día}} \cdot \frac{9,25\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{1\text{día}}{86.400\text{seg}} \cdot 0,50 = 0,11 \frac{\text{MW térmicos}}{\text{ton diaria}}$$

$$\frac{1.000\text{kg}}{\text{día}} \cdot \frac{9,25\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{1\text{día}}{86.400\text{seg}} \cdot 0,30 = 0,064 \frac{\text{MW eléctricos}}{\text{ton diaria}}$$

$$\frac{1.000\text{kg}}{\text{día}} \cdot \frac{9,25\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{1\text{día}}{86.400\text{seg}} \cdot 0,20 = 0,043 \frac{\text{MW pérdidas}}{\text{ton diaria}}$$

Por lo tanto, para una ciudad como Paysandú, con una generación de MSW del orden de 60 ton/día, se tendría un potencial de generación de:

$$\frac{60.000\text{kg}}{\text{día}} \cdot \frac{9,25\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{1\text{día}}{86.400\text{seg}} \cdot 0,50 = 3,21 \text{ MW térmicos}$$

$$\frac{60.000\text{kg}}{\text{día}} \cdot \frac{9,25\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{1\text{día}}{86.400\text{seg}} \cdot 0,30 = 1,93 \text{ MW eléctricos}$$

$$\frac{60.000\text{kg}}{\text{día}} \cdot \frac{9,25\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{1\text{día}}{86.400\text{seg}} \cdot 0,20 = 1,28 \text{ MW pérdidas}$$

3. Tecnologías de recuperación de la energía de los residuos (WTE).- Se pueden separar los procesos de recuperación de la energía de los residuos en dos grupos: Conversión Biológica y Conversión Térmica

3.1 Conversión Biológica.- Este proceso es efectuado por bacterias mediante el proceso de digestión anaerobia, donde la fracción orgánica de los residuos se descompone de manera natural en ausencia de aire. Este proceso ocurre en rellenos sanitarios (algunos controlados y otros no) donde se genera una mezcla de gases, conocida como biogás, cuyos dos componentes principales son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂) [11].

3.2 Conversión Térmica.- El proceso térmico consiste en la conversión de los MSW en productos gaseosos, líquidos y sólidos mediante reacciones químicas inorgánicas.

La conversión térmica de los residuos puede darse de tres formas diferentes: combustión, gasificación y pirólisis. En la combustión y en la gasificación la reacción química que se produce es exotérmica, lo que significa que se libera energía directamente. Sin embargo en la gasificación se obtiene un producto gaseoso con un poder calorífico remanente que luego podrá ser aprovechado en una combustión posterior. En la pirólisis, la reacción es endotérmica, pero se obtiene un gas derivado cuyo poder calorífico también puede aprovecharse en una combustión posterior.

En la siguiente figura puede observarse las diferentes opciones de conversión de residuos a sus formas secundarias de energía.

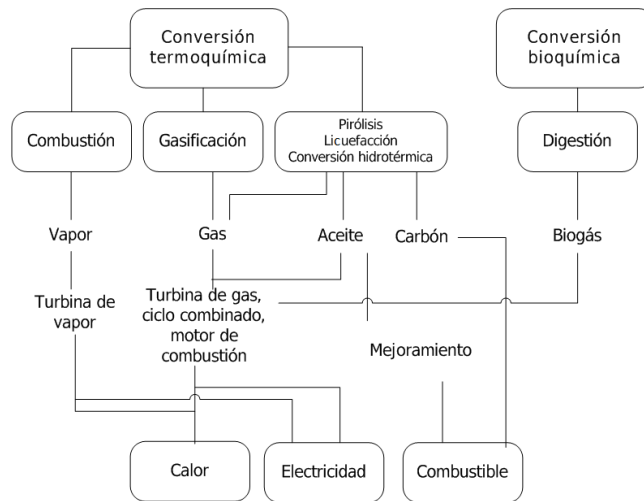


Figura XIV: Opciones de conversión de biomasa a formas secundarias de energía [12].

Dentro de las tecnologías de conversión térmica la más popular y extensa en su uso es la incineración o quema en grilla / parrilla, luego está la gasificación por lecho fluido burbujeante, circulante y fijo. Estas tecnologías se utilizan principalmente en plantas de gran escala (capacidad mayor a 500 ton/día). Existen otras tecnologías como el sistema cBOS, COR, Energos, Aireal, que no son tan populares como las anteriormente mencionadas, pero están empezando a ser utilizadas como nuevas alternativas para la conversión de residuos en energía, y que además son aplicables a plantas de pequeña escala [1].

4. Caso de estudio.- El objetivo principal del proyecto realizado[1] fue determinar la viabilidad técnica y financiera de un emprendimiento de generación de energía a partir de residuos, como también la realización un diseño preliminar de un proyecto de estas características. Se comenzó considerando los residuos municipales ubicados en el vertedero municipal de Casa Blanca, Paysandú y a partir de sus propiedades físico-químicas se seleccionó la tecnología a utilizar y los insumos y equipos necesarios para el funcionamiento. Además se analizaron y dimensionaron los sistemas de la planta, como ser los hidráulicos, neumáticos y eléctricos. Por otro lado se proyectó una disposición tipo de la planta, teniendo en cuenta los equipos necesarios, sus dimensiones y la operación de la planta. Finalmente se realizó un análisis financiero, para evaluar económicamente la viabilidad del proyecto.

4.1 Residuos considerados.- El proyecto planteado pretende utilizar los residuos municipales de la ciudad de Paysandú que actualmente se disponen en un vertedero de cielo abierto en la localidad de Casa Blanca. Para el caso de estudio se dispone de 60 ton/día⁶ de residuos.

Dado que no fue posible realizar la toma de muestra de residuos y los análisis químicos correspondientes, se efectuaron estimaciones del poder calorífico y de la composición química de los residuos municipales de Paysandú (Ver apartado 2). De acuerdo al análisis se obtuvo un combustible con un poder calorífico de 9,25 MJ/kg y una humedad de 59 % [1].

4.2 Locación de la planta.- Se proyectó ubicar la planta próxima al actual vertedero municipal (Casa Blanca), como se puede apreciar en la siguiente imagen:

⁶Dato obtenido de estudio de informes de la Intendencia Municipal de Paysandú [7], el cual se verificó con datos de generación per cápita (0,7 kg/hab/día [9]) y la población de la ciudad (85.800 personas al 2004 [13]b).



Figura XV: Ubicación de la Planta [1].

4.3 Tecnología seleccionada.- Se analizaron las ventajas y desventajas de las distintas alternativas para la conversión de residuos en energía y se optó por el Sistema de Oxidación por Batch (Batch Oxidation System -cBOS™), el cual presenta una construcción sencilla y además cuenta con una capacidad adecuada para el caso de estudio. En este caso no se tuvo en cuenta ningún tipo de clasificación o reciclado previo de los residuos. Por otro lado, para la recuperación de los gases de combustión, se optó por un sistema de caldera de aceite térmico y Ciclo de Rankine de fluido Orgánico (ORC). A continuación se presenta un esquema del funcionamiento de la planta y un diagrama de todo el sistema.

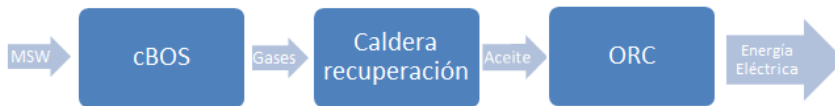


Figura VI: Esquema de funcionamiento de la Planta.

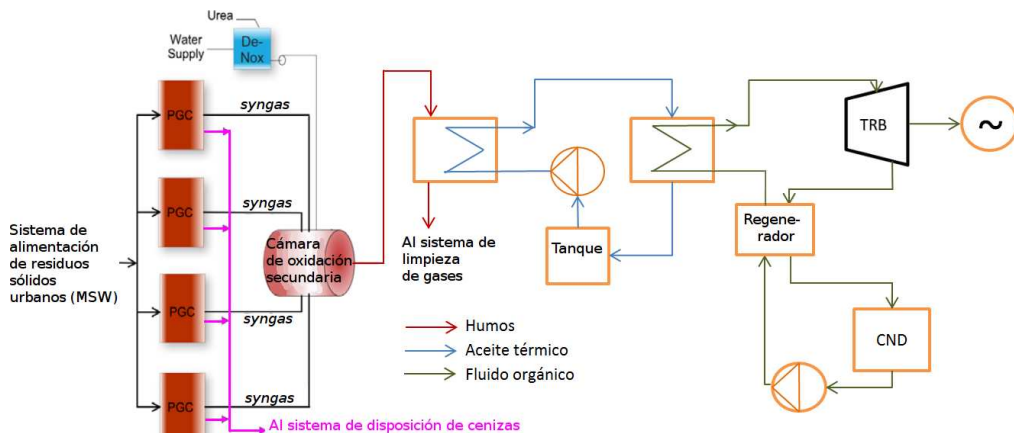


Figura XVII: Diagrama de proceso del sistema cBOS con ORC.

En una primera instancia los residuos (MSW) ingresan al sistema de combustión (cBOS) donde se generan gases calientes. Estos gases son enviados a una caldera de recuperación, donde ceden su energía a un aceite térmico. Este aceite es enviado al Ciclo Orgánico de Rankine (ORC), el cual calienta un fluido orgánico que luego se expande en una turbina conectada a un generador, obteniéndose así la energía eléctrica.

El sistema cBOS, por sus siglas en inglés (Continuous Batch Oxidation System), es un sistema mixto en cuanto a su operativa. Por un lado las cámaras primarias realizan un proceso en batch, mientras que la cámara secundaria funciona de manera continua. Los MSW son cargados en las cámaras primarias de gasificación (PGC), con un desfase temporal de 6 horas entre cada una. En ellas los MSW sufren una serie de procesos químicos y físicos en una atmósfera deficiente de oxígeno (ignición, gasificación, reducción de carbonos remanentes), lo que genera la producción de un gas denominado gas de síntesis (syngas). Una vez finalizado este proceso se da el enfriamiento y descarga de las cenizas. Cada PGC está equipada con un sistema de carga sellado hidráulicamente, dos puertas de acceso para la remoción de las cenizas, un ventilador de aire primario y dos de aire secundario, dos quemadores de gasoil, cuatro boquillas para rocío de agua para el templado de las cenizas y una válvula actuada para aislar las cámaras primarias de la secundaria.



Figura VIII: Sistema cBOS: Cámaras primarias (al frente), cámara secundaria (al fondo) y sist. de limpieza de gases (a la izquierda)[14].

El syngas proveniente de cada cámara primaria pasa luego a la cámara secundaria (SCC) donde se realiza su combustión y es oxidado totalmente mediante la adición de aire tomado del ambiente y humos de combustión recirculados. El volumen de humos recirculados es de aproximadamente un 15% del total de humos, lo que ayuda a la disminución de óxidos nitrosos (NO_x). Gracias al desfase temporal en la operación de las cámaras primarias, el syngas que se suministra a la cámara secundaria es de características uniformes [1]. En la cámara secundaria de combustión existe también una inyección de una solución de urea para el tratamiento de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y su reducción en NH_3 (reducción selectiva no-catalítica). La reacción de oxidación del syngas es exotérmica y permite alcanzar las temperaturas mínimas reglamentadas para la quema de residuos en Escocia: 1.100 °C para residuos peligrosos, 850°C para residuos no peligrosos (en Uruguay la temperatura mínima de quema de RSU no está reglamentada). En caso de no alcanzar estas temperaturas, dos quemadores auxiliares a gasoil se encienden para asistir la combustión (estos quemadores también se utilizan para el arranque). La concentración de oxígeno en la cámara y la temperatura son controladas cuidadosamente para minimizar las emisiones de dioxinas [15,16].

Los humos de la combustión pasan luego hacia una caldera de aceite térmico, donde intercambian su energía con el aceite térmico. Este aceite caliente se envía a un ciclo ORC para calentar y evaporar un fluido orgánico, el cual será utilizado para realizar trabajo en una turbina acoplada a un generador eléctrico.

Los sistemas ORC se utilizan en rangos de potencia pequeña (menor a 2MW). Estos ciclos cuentan con la ventaja de que vienen paquetizados, lo que facilita su instalación. Aunque no permiten cogeneración en régimen electricidad-vapor, sí lo permiten en régimen electricidad-agua caliente. Esto es una buena solución en lugares donde hay grandes necesidades de agua

caliente, como ser ciudades frías con sistemas de calefacción residencial centralizado. En el caso de estudio las necesidades de agua caliente son pequeñas, por lo que no se justifica esta alternativa. A pesar de esto sigue siendo una buena opción, comparado con un ciclo de vapor de baja presión, debido a la uniformidad de operación, sencillez y fiabilidad [1]. En la siguiente figura, se puede apreciar un sistema ORC :



Figura IX: Sistema ORC [17].

Una vez que los gases de combustión intercambian energía en la caldera de aceite pasan hacia el sistema de tratamiento de gases. Este sistema utiliza un proceso seco con bicarbonato de sodio para la remoción de los gases ácidos y carbón activado en polvo (PAC) para la remoción de dioxinas y metales pesados. La última etapa involucra un filtro de mangas que captura el material particulado contenido en los humos, tanto el material particulado que proviene de la combustión como el que se inyecta en el sistema de limpieza. El gas limpio es liberado a la atmósfera a través de una chimenea de 21 metros [1]. Vale recalcar que el sistema de combustión de la caldera y el equipamiento de tratamiento de gases están diseñados para que las emisiones atmosféricas resultantes cumplan con las normativas escocesas.

4.4 Análisis energético del sistema cBOS.- Se realizaron dos simulaciones al sistema de combustión para obtener las propiedades y flujos de los gases de combustión que serán utilizados para la generación de energía eléctrica. El primer método consistió en considerar la cámara primaria de gasificación y la cámara secundaria de gasificación como una misma unidad y considerar la combustión directa del combustible. El segundo método separa el proceso en dos etapas, planteando un sistema compuesto por el gasificador, donde ingresa aire y combustible y sale syngas, y un segundo sistema compuesto por la cámara de combustión donde el syngas se quema produciendo los gases calientes de combustión.

Los resultados de ambos análisis difieren en un orden del 2%, lo cual asegura la confiabilidad de los resultados [1].

En la siguiente figura se muestra los resultados de la simulación del primer método :

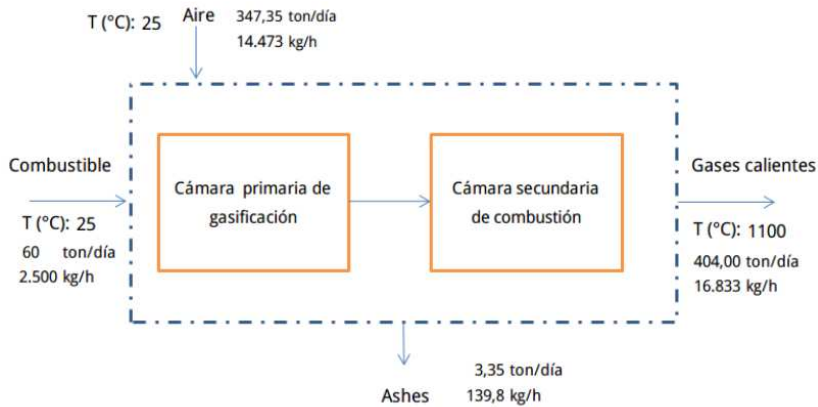


Figura X: Flujos diarios resultantes [1].

Con el flujo de gases calientes calculado mediante la simulación, y a la temperatura calculada, la generación de energía eléctrica es del orden de 1,6MW, lo que dejará una energía generada neta de 1,2MW para su venta, siendo los 0,4MW restantes utilizados en los sistemas internos de la planta.

4.5 Análisis financiero.- El objetivo del análisis financiero radica en contar con una herramienta útil para una correcta toma de decisión. No solo el proyecto debe cumplir los requerimientos técnicos y específicos de una planta WTE, sino también, debe ser rentable para incentivar a instituciones privadas y estatales para su aplicación. En este caso se tomó un horizonte de 25 años como período de inversión. Se consideró una financiación por parte de un privado y se consideró la disponibilidad de un fondo no reembolsable, motivado por las consecuencias positivas a nivel ambiental y de gestión de los residuos que conlleva un proyecto de este tipo. Este último aspecto se alinea con uno de los objetivos que tiene el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) para el período 2011-2015 en el Uruguay, el cual ha entregado en los últimos cinco años más de 17 millones de dólares en fondos no reembolsables [18].

Los ingresos de la planta se dividieron en tres grupos. El primero de ellos corresponde a la venta de energía eléctrica a la red. Luego existen ingresos por venta de bonos o créditos de carbono, provenientes de la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero como consecuencia del proyecto y, finalmente, se prevén ingresos por gate-fee o tarifa por gestión de residuos (costos de disposición).

Aquí aparecen dos aspectos que merecen ser aclarados:

Créditos de Carbono: El tratamiento de los residuos en una planta WTE tiene una ventaja de ahorro en emisiones de metano frente al relleno sanitario, teniendo en cuenta que el metano (CH₄) tiene un potencial de generación de efecto invernadero 21 veces más potente que el anhídrido carbónico (CO₂). Por lo cual, por cada tonelada de residuos que se quema en la planta en vez de ser enviada al relleno sanitario, se reduce su impacto en la generación de gases de efecto invernadero [19].

Gate-fee: El gate-fee consiste en una tasa que la municipalidad paga a las plantas WTE, por cada tonelada de MSW de la que se hacen cargo. Actualmente, los vertederos municipales tienen un cierto costo operativo, y la implantación de una planta WTE suplantaría la necesidad de enviar los residuos a un vertedero. Por lo tanto, podría tomarse un gate-fee igual al costo operativo de un vertedero como valor base. Es usual que se paguen montos mayores para fomentar las inversiones en plantas WTE.

Habiendo aclarado estos puntos, se presenta el resumen del análisis financiero en la siguiente tabla.

| | | |
|--|------------|---------|
| Potencia instalada | 1,2 | MW |
| Horas al año de funcionamiento | 8.400 | hs/año |
| Capacidad de generación anual | 10.080 | MWh/año |
| Tarifa de venta de Energía Eléctrica | 117 | USD/MWh |
| Gate-fee por ton/MSW | 9 | USD/ton |
| Ingreso por venta de Energía Eléctrica | 1.179.360 | USD/año |
| Ingreso por venta de Bonos de Carbono | 153.000 | USD/año |
| Ingresos por Gate-fee | 189.000 | USD/año |
| Ingresos anual bruto | 1.521.360 | USD/año |
| Costos operativos | 900.000 | USD/año |
| Ingreso anual neto | 621.360 | USD/año |
| Costo total de inversión estimado | 12.500.000 | USD |
| Período de repago (lineal) | 20 | años |

Tabla VI Análisis Financiero [1]

5. Conclusiones.- Las plantas WTE resuelven dos grandes problemas: recuperar la energía de los residuos y controlar las emisiones de los principales contaminantes. Además proporcionan una nueva fuente de energía renovable, estable y compatible con el medioambiente.

Desde el punto de vista financiero se considera la venta de bonos de carbono, ya que estos generan ingresos adicionales que mejoran la economía de las plantas. Por otro lado, al vender bonos de carbono, se está cumpliendo con el compromiso del protocolo de Kyoto, en el cual Uruguay está como país no incluido en el Anexo 1, pudiendo emitir créditos de carbono.

Es importante que la gate-fee sea tenida en cuenta en estos proyectos ya que genera también un ingreso adicional en la planta. Sin estas tasas, los proyectos no serían rentables.

Es importante poder generar en las personas un cambio de paradigma, dejando de pensar que los residuos son algo inútil y, que generar energía a partir de ellos es un desafío importante para el gobierno, empresas privadas y la sociedad misma. Para ello es necesario reunir los recursos necesarios y dirigir y promocionar iniciativas para obtener los beneficios señalados.

6. Referencias

- [1] Moratorio, D.; Rocco, I. *Proyecto para la conversión de residuos en energía*, Tesis de Grado, Universidad de Montevideo, Diciembre 2011.
- [2] Cheng, H.; Hu, Y. *Municipal Solid Waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China*, Bioresource Technology, 2010. 101: 3816-3824.
- [3] Lund, H.; Muenster, M. *Comparing Waste-to-Energy technologies by applying energy system analysis*, Waste Management, 2010. 30: 1251-1263.
- [4] Themelis, N.J. *Recovering energy from Waste - PART A:MSW Management in the City of Buenos Aires, Argentina and Potential for a Waste-To-Energy Plant*, Columbia University, Agosto 2011.

- [5] Gidarakos, E.; Havas, G.; Ntzamilis, P. *Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete*, Waste Management, 2006. 26: 668-679.
- [6] Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S. *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management*, 1993, McGraw-Hill.
- [7] Intendencia Municipal de Paysandú, *Bases para un Plan Estratégico de Desarrollo, 1998*, disponible en <http://www.paysandu.com/promocionydesarrollo/470.htm>, último acceso en julio 2011.
- [8] CEPIS, OPS, *Análisis Sectorial de Residuos Sólidos en Uruguay, 1996*, disponible en <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/analisis/uruguay/uruguay4.html>, último acceso en julio 2011.
- [9] Badami, M.; Mittica, A.; Poggio, A. *MSW Incineration Capacity Evaluation for the Province of Turin (Northern Italy)*, Conferencia Norteamericana de WTE (NAWTEC16), 2008.
- [10] Department of Energy and Climate Change - UK. *Combined Heat and Power Focus - What is Combined heat and power?*, disponible en <http://chp.decc.gov.uk/cms/what-is-chp>, último acceso en mayo 2012.
- [11] Fernández, J. *La Basura como recurso energético. Situación actual y prospectiva en México*, Boletín del Instituto de Investigaciones, Enero – Marzo 2011.
- [12] Saidur, R. et al. *A review on biomass as a fuel for boilers*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(5): 2262-2289.
- [13] El Espectador, *Claves Sanduceras*, disponible en http://www.espectador.com/1v4_contenido.php?id=40133&sts=1, último acceso en julio 2011.
- [14] Greenenergy Solutions, inc., *Sistema cBOS*, disponible en <http://www.greenenergyph.com/cbos.html>, último acceso en mayo 2012.
- [15] Scottish environment protection agency. Permit to operate a 'PART A' installation. Operator: ScotGen (Dumfries) Ltd. http://www.sepa.org.uk/air/process_industry_regulation/pollution_prevention_control/public_participation_directive/ppd_consultations/idoc.ashx?docid=cd5ad028-0aed-4823-ac2a-c5f4227acc2a&version=-1.
- [16] Sheepbridge Resource Park Limited. Determination of an application for an environmental permit under the environmental permitting (England & Wales) regulations 2010. <http://www.againstincineration.org.uk/wp-content/uploads/2010/09/Sheepbridge-FINAL-DD-09-September-10.pdf>.
- [17] Pacific Heat and Power, *Heat Recovery*, disponible en http://www.pacificheatandpower.com/index.php/organic_rankine_cycle_turbines, último acceso en mayo 2012.
- [18] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, *Recursos movilizados por el PNUD para la ejecución de proyectos de desarrollo Período 2007 – 2011*, disponible en <http://www.undp.org.uy/pnudUruguay.asp>, último acceso en agosto 2012.
- [19] Themelis, N.J.; Diaz Barriga, M.E. *Estudio De Pre-Factibilidad Técnica Y Económica Para La Instalación De Capacidad De Generación De Energía A Partir De Residuos (WTE) en Uruguay*, Themelis Associates, Enero 2012.