

## CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

En México, el proceso de industrialización que se intensificó a partir de la segunda mitad del siglo pasado derivó en una mayor demanda de materias primas, para satisfacer el creciente consumo de bienes y servicios de una población; cada vez más numerosa y con patrones de consumo cada vez más demandantes. Como consecuencia, se agravaron los problemas ambientales como la contaminación del aire y la generación de residuos tanto urbanos como industriales.

Actualmente, México tiene una población de 112.3 millones de habitantes, generando en promedio per cápita 970 gramos de residuos sólidos urbanos. Para el tratamiento de dichos residuos cuenta con un total de 137 rellenos sanitarios con una capacidad de 22.175 billones de toneladas, para disposición final, 24 rellenos de tierra controlados con una capacidad de 3.924 billones de toneladas y 161 sitios controlados con capacidad de 26.1 billones de toneladas. Se estima que el 67% de los RSU generados en el país se dispone en rellenos sanitarios y sitios controlados y el 33% restante en sitios no controlados. Por lo que, México no cuenta con ninguna tecnología termoquímica instalada para el tratamiento de los RSU.

De los 137 rellenos existentes, únicamente 1 relleno sanitario aprovecha el metano que se libera de la descomposición de los residuos orgánicos. En este proceso participan bacterias metanogénicas que como parte de los residuos de su digestión producen el gas metano, el cual forma parte en un 50% del biogás generado. Dicho gas se aprovecha en la producción de energía eléctrica, mediante motores de combustión interna, con una capacidad de 17 MW, generando 120,000 MWh/año. De esta forma, se evita la utilización de combustibles fósiles derivados del petróleo como el gas natural o el combustóleo en la producción de electricidad. Del resto de los rellenos no existe aprovechamiento de los gases liberados, los cuales, son liberados a la atmósfera totalizando una emisión de 26,071,428.5 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/año. Con esta cifra México se ubica en el tercer lugar de emisiones de metano en el mundo.

Sin embargo, en Europa existe una ley que limita el crecimiento de los rellenos sanitarios en los países miembros de la Unión Europea. Por lo que se prevé que en los próximos años estos desaparezcan, y crezcan primero las plantas de incineración con generación de energía y posteriormente las plantas de gasificación. Así como una paralela mayor actividad de reciclamiento.

Citando tres ejemplos en el contexto internacional en E.E. U.U, el 8% de sus residuos es incinerado, contando con 750 plantas de incineración con capacidad de 29 millones de toneladas/año; 7% es enviado a compostaje, 20% reciclado y 65% enviado a rellenos sanitarios. En China, el 2% de sus residuos es incinerado, 70% enviado a rellenos sanitarios, 20% a compostaje y 10% no definido. Canadá envía a 47 rellenos sanitarios el 97% de sus residuos sólidos urbanos y el resto lo envía a 7 plantas principales de tratamiento termoquímico. De las cuales, 4 plantas de incineración con capacidad de 25 ton/día generando aproximadamente 5.23 PJ de energía. De este total, 2.75 PJ son vendidos en forma de electricidad, vapor o agua caliente. Estos 3 países ocupan el primer, segundo y cuarto lugar respectivamente de emisiones de metano a la atmósfera mundial por el manejo de sus residuos sólidos urbanos.

Se estima que por cada tonelada de desechos tratada mediante incineración, el rendimiento oscila entre 250 y 750 KWh. Siendo que, 1 tonelada de desechos sólidos tratada mediante gasificación, corresponde a un rendimiento de 600 KWh. Por otra parte se estima que por cada tonelada de residuos sólidos depositados en el relleno sanitario se generan 100 m<sup>3</sup> de metano. De los sistemas actuales, se puede esperar un rendimiento de energía eléctrica a partir de la basura confinada en rellenos sanitarios de 100 a 200 KWh por tonelada de basura. Por ello, se estima un potencial de 2.5 GWh provenientes del biogás de los rellenos sanitarios en México.

Por otra parte, los combustibles que se utilizan para generar energía eléctrica en México, son únicamente los combustibles fósiles en plantas generadoras aportando el 73.3%. De esta capacidad, las centrales eléctricas que utilizan gas natural aportan 39% de la capacidad total de

energía eléctrica para servicio público. Mientras que la capacidad con base en combustóleo se ubica en 25% respecto al total instalado, seguido de los hidrocarburos líquidos y petrolíferos con el 19%. Dicho consumo de combustibles, contribuye con el 10% aproximadamente de las emisiones de CO<sub>2</sub> totales de Norteamérica, con 444 millones de toneladas de bióxido de carbono a la atmósfera.

La tecnología de combustión es la mayor fuente de emisión de gases GEI, principalmente si los combustibles son el carbón o el carbón mezclado con biomasa con  $2.7 \times 10^{-7}$  y  $2.5 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub> respectivamente. Si la combustión se realiza con residuos sólidos la emisión es de  $1.3 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>. Sin embargo resulta ser la tecnología más económica con un costo de  $\$8.33 \times 10^{-6}$  usd/KJ<sub>e</sub>, para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos.

La tecnología de gasificación tiene una disminución de emisiones con respecto a la combustión de residuos sólidos con  $4.9 \times 10^{-8}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ, siempre y cuando se trate de la tecnología de gasificación y ciclo combinado. Y como pasa en la combustión, cuando hay alimentación dual de combustible de biomasa y carbón hay una disminución de emisiones con respecto a la gasificación del carbón con  $1.02 \times 10^{-8}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub> y  $2.2 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>, respectivamente. Su costo de generación es de  $\$1.0 \times 10^{-5}$  usd/KJ<sub>e</sub>.

La pirólisis de los residuos orgánicos, es la tecnología con menores emisiones de todas las tecnologías estudiadas, con  $1.2 \times 10^{-9}$  ton eq CO<sub>2</sub> /KJ<sub>e</sub>, pero debe considerarse que la planta debe producir aceite pirolítico y ser autosuficiente. Es decir, que tanto la producción del aceite pirolítico como la generación eléctrica debe realizarse in situ. Por tanto, el combustible no debe requerir transporte hacia la planta de generación eléctrica. Cuando la alimentación es dual en una planta convencional de combustible fósil como el carbón, las emisiones aumentan a  $4.6 \times 10^{-8}$  tonCO<sub>2</sub> eq /KJ<sub>e</sub>. Cuando la pirólisis se alimenta con residuos sólidos urbanos la emisión de GEI aumenta a  $1.2 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>, y presenta un costo de generación con  $\$1.1 \times 10^{-5}$  usd/KJ<sub>e</sub>.

Con respecto a la tecnología de conversión bioquímica, la digestión es llevada a cabo tanto en reactores cerrados y controlados, como en los rellenos sanitarios. La digestión en rellenos sanitarios emite la misma cantidad de GEI, que la combustión del combustóleo, con  $2.0 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>. Mientras que la digestión de desechos sólidos urbanos en reactores tiene una disminución en sus emisiones con  $9.0 \times 10^{-8}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>. Con respecto a los costos, para digestores con capacidades de hasta 10,000 m<sup>3</sup>, el costo de generación oscila en  $\$5.5 \times 10^{-6}$  usd/KJ<sub>e</sub>. Sin embargo, si la capacidad del digestor disminuye a 100 m<sup>3</sup>, el costo se incrementa a  $\$5.0 \times 10^{-5}$  usd/KJ<sub>e</sub>. Otro factor que influye en el costo, es el transporte de la biomasa, si la biomasa son desechos o aguas residuales el costo de entrega es de  $\$1$  usd/GJ.

Por otra parte, la Secretaría de Energía tiene un programa de expansión al año 2025 de 6,899 MW. En el que agrupa diversas opciones tecnológicas para la expansión del sistema de generación, con la importante característica de tratarse de una canasta tecnológica. Con esto produciría niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> prácticamente nulos. Las tecnologías posibles que está tomando en consideración son: Gasificación, ciclo combinado, importación, carboeléctrica, nucleoelectrica y la combustión interna.

Si se toma en cuenta que hasta ahora los combustibles de mayor uso en México para producción son los combustibles fósiles, la opción más viable para llevar a cabo el proyecto de expansión se llevaría a cabo con la gasificación de combustible dual carbon y biomasa. Puesto que, tiene emisiones del orden de los  $1.02 \times 10^{-8}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>, ya que dichos gasificadores funcionan con un rango del 10 al 15% de biomasa y 90% de combustible convencional, a comparación de la combustión dual que tiene emisiones de  $2.5 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>. Inclusive tomando en cuenta que el gas natural es el combustible más utilizado en la generación eléctrica y sabiendo que tiene una emisión menor a la del carbón de  $1.6 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>, se podría proponer también la alimentación dual de gas natural y biomasa, y se conseguiría una emisión por debajo de la emisión dual del carbón y biomasa, con  $1.49 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>.

El poder calorífico de cada producto obtenido de las diversas tecnologías varía en un rango de los 4-6 MJ/m<sup>3</sup> del gas obtenido en la gasificación con una atmósfera de oxidación de aire y de 10-15 MJ/m<sup>3</sup> cuando la atmósfera de gasificación es con oxígeno. El poder calorífico del aceite obtenido de la pirólisis de los residuos sólidos urbanos es de 24.4 MJ/Kg y de 42 MJ/Kg, si el aceite proviene de las llantas. El poder calorífico del gas obtenido de la pirólisis de los residuos sólidos urbanos es de 18 MJ/m<sup>3</sup> y el gas de la pirólisis de las llantas es de 40 MJ/Kg. Por otro lado, el metano contenido en el gas de los digestores puede variar entre el 50% y 75%, lo cual afecta directamente el poder calorífico desde los 20 a los 25 MJ/m<sup>3</sup>.

En la Tabla 7.1 se puede observar los diversos poderes caloríficos de los combustibles analizados y de los posibles combustibles obtenidos de cada proceso. Se puede concluir que el poder calorífico que se obtiene del carbón, se puede obtener también del aceite pirolítico de los residuos sólidos. También se observa, que el poder calorífico del combustóleo se puede conseguir también del aceite y gas pirolítico proveniente de las llantas. Mientras que el biogás tiene un poder calorífico cercano al del gas natural, inclusive el biogás se puede conducir por los mismos ductos que el gas natural.

**Tabla 7.1 Comparativo de poderes caloríficos de los productos obtenidos de la gasificación y pirólisis con diversos tipos de combustibles**

	Poder calorífico	Combustibles	Poder calorífico
<b>GASIFICACIÓN</b>		Gas natural	37 MJ/m <sup>3</sup>
Gasificación con aire	4-6 MJ/m <sup>3</sup>	Carbón	25 MJ/Kg
Gasificación con oxígeno	10-15 MJ/m <sup>3</sup>	Combustóleo	46 MJ/Kg
<b>PIRÓLISIS</b>		Desechos orgánicos	13 MJ/Kg
Aceite (R.S.U)	24.4 MJ/Kg	Biogás	20 MJ/m <sup>3</sup>
Aceite (biomasa)	24.7 MJ/Kg	D.V.M	17MJ/Kg
Aceite (llantas)	42.0 MJ/Kg	Madera	12.9-16 MJ/Kg
Gas (R.S.U)	18 MJ/m <sup>3</sup>	R.S.U	8-12 MJ/Kg
Gas(llantas)	40 MJ/m <sup>3</sup>	Carbohidratos	11 MJ/Kg
Residuos de la pirólisis (R.S.U)	19 MJ/Kg	Grasas	30 MJ/Kg

De las 4 tecnologías estudiadas, tanto la digestión en rellenos sanitarios, con costo de  $8.3 \times 10^{-6}$  usd/KJ<sub>e</sub> y la gasificación con un costo de  $1.1 \times 10^{-5}$  usd/KJ<sub>e</sub>, son las mejores tecnologías para el tratamiento de los residuos. La gasificación de residuos resulta ser la menos contaminante con  $4.9 \times 10^{-8}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>, en tanto que la digestión en rellenos emite  $2.0 \times 10^{-7}$  tonCO<sub>2</sub> eq/KJ<sub>e</sub>. Sin embargo, los rellenos se encuentran instalados actualmente en México y plantas de gasificación no existen aún operando actualmente. Por lo que restaría explotar el potencial de cada relleno sanitario.