



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ENERGÍA

ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS  
DE LA CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE LA TECNOLOGÍA DE GASIFICACIÓN.

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERIA DE LA ENERGÍA

PRESENTA:  
RICARDO FABIÁN ESPINOSA MACHORRO.

JAVIER EDUARDO AGUILLÓN MARTÍNEZ  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, FACULTAD DE INGENIERÍA.

CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE 2016

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. ARTURO REINKING CEJUDO

Secretario: DR. MARTÍN SALINAS VAZQUEZ

Vocal: DR. JAVIER EDUARDO AGUILLÓN MARTÍNEZ

1<sup>er</sup>. Suplente: DR. JORGE MARCIAL ISLAS SAMPERIO

2<sup>d o</sup>. Suplente: M. en I. AUGUSTO SANCHEZ CIFUENTES

INSTITUTO DE INGENIERÍA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

DR. JAVIER EDUARDO AGUILLÓN MARTÍNEZ

-----  
**FIRMA**

## RESUMEN.

En este trabajo de tesis se estudia la producción de hidrógeno de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) de la ciudad de México por medio de la tecnología de gasificación, el estudio se hace con el software ASPEN plus mediante simulaciones de las cuales se enfocan en un análisis de sensibilidad para analizar la composición del gas de síntesis cuando la gasificación es estable y posible de realizarse físicamente. Las simulaciones se efectuaron gasificando los Residuos Sólidos Urbanos con los tres agentes de gasificación que son: oxígeno puro, aire y vapor de agua a una presión y temperatura específicas. Del análisis de sensibilidad se revisan los parámetros más importantes de la gasificación utilizando parámetros en su mayoría adimensionales para generalizar los resultados obtenidos de las simulaciones.

En el primer capítulo se presenta la clasificación de los Residuos Municipales, la composición física de los mismos, su disposición y finalmente de cómo es que se tratan actualmente en el país ya sea por una disposición final en un asentamiento, separación de los residuos, reciclaje, etcétera, así mismo algunos conceptos generales de los Residuos Municipales necesarios para comprender su clasificación.

En el segundo capítulo se presenta lo que es la gasificación, la clasificación de los gasificadores general y los utilizados en la industria para obtener gas de síntesis a través de Residuos Sólidos Urbanos en otros países, el porqué del análisis del hidrógeno como un posible combustible a futuro y como el software ASPEN plus resuelve ecuaciones en este caso enfocado en los bloques utilizados en el presente estudio.

En el tercer capítulo se presenta la descripción del proceso de gasificación, las propiedades químicas necesarias para utilizar el software ASPEN plus para realizar el estudio, los parámetros adimensionales necesarios para analizar los resultados que arroja el software, la descripción del proceso como fue realizado en el software ASPEN plus, y la validación científica del modelo utilizado.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados de las simulaciones realizadas en el software mostrando el análisis de la gasificación de los parámetros más importantes con sus diferentes agentes de gasificación que son el oxígeno, el aire atmosférico y el vapor de agua.

## **NOMENCLATURA.**

### **Instituciones.**

UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México.
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
INE	Instituto Nacional de Ecología.
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social.
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
DOF	Diario Oficial de la Federación.
NOM	Norma Oficial Mexicana.
IPN	Instituto Politécnico Nacional.
UAM	Universidad Nacional Autónoma de México.
CDMX	Ciudad de México.
OLADE	Organización Latinoamericana de Desarrollo Económico.
OCDE	Organización de Cooperación y el Desarrollo Económico.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
RDF	Refuse Derived Fuel.

### **Unidades.**

%mol	Composición molar.
%wt	Composición en peso.
kg	Kilogramo.
kJ/kmol	KiloJoule por kilomol.
kg/día	Kilogramo por día.
Ton/día	Tonelada por día.
kg/hab/día.	Kilogramo por habitante por día
kg/hab/año	Kilogramos por habitante por año.

kmol/sec	Kilomol por segundo.
kg/h	Kilogramo por hora.
kW	Kilowatts.
CO <sub>2</sub> e	Dióxido de Carbono equivalente.
Bar	Bar.
K	Kelvin.
km <sup>2</sup>	Kilómetro cuadrado.
rpm	Revoluciones por minuto.

### **Términos y símbolos.**

PIB	Producto Interno Bruto.
RS	Residuos Sólidos.
RSM	Residuos Sólidos Municipales.
RSU	Residuos Sólidos Urbanos.
MSW	Municipal Solid Waste (Residuos Sólidos Urbanos).
RME	Residuos de Manejo Especial.
RP	Residuos Peligrosos.
T	Temperatura.
P	Presión.
PR-BM	Peng Robinson – Boston Mathias.
C	Carbono.
H	Hidrógeno monoatómico.
O	Oxígeno monoatómico.
N	Nitrógeno monoatómico.
S	Sulfuro.
Cl	Cloro.
ASH	Ceniza.

H <sub>2</sub>	Hidrógeno.
O <sub>2</sub>	Oxígeno.
N <sub>2</sub>	Nitrógeno.
CH <sub>4</sub>	Metano.
CO	Monóxido de Carbono.
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono.
NH <sub>3</sub>	Amoniaco.
H <sub>2</sub> S	Ácido Sulfhídrico.
HCl	Ácido Clorhídrico.
H <sub>2</sub> O	Agua.
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Etino.
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Eteno.
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Etano.
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benceno.
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrógeno.
CHAR	Carbonizado.
TAR	Alquitrán.
OR	Orgánicos.
MC	Humedad (Moisture Content).
VM	Materia volátil (Volatile Matter).
FC	Carbón fijo (Fixed Carbon).
PCS	Poder Calorífico Superior.
PCI	Poder Calorífico Inferior.
HHV	High Heating Value (Poder Calorífico Superior).
LHV	Low Heating Value (Poder Calorífico Inferior).
ER	Relación de Equivalencia (Equivalence Ratio).

CGE	Eficiencia de Gas Frio (Cold Gas Efficiency).
$m_i$	Fracción masa.
$n_i$	Fracción mol.
$v_i$	Fracción volumen.
$p_i$	Presión parcial.

## **ANTECEDENTE.**

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo aunque lamentablemente en la tierra no se encuentra en estado libre. El hidrógeno no es un recurso natural a diferencia de los hidrocarburos ya que no se puede obtener mediante tareas de extracción del mismo.

Actualmente los hidrocarburos representan una gran parte de los combustibles utilizados, pero para poder tener seguridad energética en el mundo, se necesita estudiar nuevos posibles combustibles de los que entre ellos se encuentra el hidrógeno.

Desde el descubrimiento del carbón y los recursos petroleros, los combustibles se han ido modificando en su cantidad de carbón e hidrógeno, desde el inicio donde se utilizaba carbón sólido, pasando por los combustibles pesados y llegando a la época actual donde el combustible de mayor uso que es el gas natural con un contenido de un carbono y cuatro hidrógenos teniendo como resultado un posible cambio a la utilización del hidrógeno como combustible del futuro.

El hidrógeno se puede obtener de muchas maneras (agua, biomasa, energía nuclear, reformación de combustibles fósiles, etc.), y para obtenerlo hay que convertir las energías primarias y sus posibles aplicaciones continúan siendo parte de múltiple investigación a nivel mundial como lo es su uso en transporte y producción de energía eléctrica.

Así mismo, la presente demanda mundial por el cuidado del medio ambiente nos obliga a la obtención de un combustible del cual no aumente niveles de contaminación y las posibilidades del hidrógeno como un combustible limpio son altas ya que no se produce dióxido de carbono y se consideran estudios de posibles escenarios donde la economía del petróleo se combine con un inicio de la economía del hidrógeno para así poder tener seguridad energética de combustibles y de producción de energía eléctrica en el futuro.

## **OBJETIVO.**

Analizar la producción de hidrógeno que proviene de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) de la Ciudad de México por medio de la tecnología de gasificación utilizando los tres agentes de gasificación que son el oxígeno, el aire atmosférico y el vapor de agua.

## **ALCANCES.**

- Análisis de la producción de hidrógeno.
- Análisis del gas de síntesis producto de la gasificación.
- Análisis de entradas y salidas del gasificador.
- Comprensión del proceso de gasificación.
- Análisis de parámetros adimensionales de la gasificación.
- Análisis de beneficios de la gasificación.

## **HIPÓTESIS.**

En la gasificación se puede obtener energía de los sólidos, estos sólidos serán convertidos en gas comúnmente llamado gas de síntesis. Al estudiar el gasificador se obtendrá una cantidad de hidrógeno la cual en su punto máximo será mejor combustible que si utilizáramos los sólidos (RSU) como combustible. También en este estudio veremos cuales condiciones actúan a favor y en contra de la gasificación y qué diferencias hay entre el uso de cada agente de gasificación para la producción de un combustible limpio.

# ÍNDICE DE CONTENIDO.

<b>Resumen.</b> .....	<b>I</b>
<b>Nomenclatura.</b> .....	<b>II</b>
Instituciones.....	II
Unidades.....	II
Términos y símbolos. ....	III
<b>Antecedente.</b> .....	<b>VI</b>
<b>Objetivo.</b> .....	<b>VII</b>
<b>Alcances.</b> .....	<b>VII</b>
<b>Hipótesis.</b> .....	<b>VII</b>
<b>Índice de contenido.</b> .....	<b>a</b>
<b>Listado de figuras.</b> .....	<b>f</b>
<b>Listado de tablas.</b> .....	<b>h</b>
<b>Listado de gráficas.</b> .....	<b>i</b>
<b>Capítulo 1. Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en México.</b> .....	<b>1</b>
<b>Antecedentes.</b> .....	<b>1</b>
Cronología Histórica. ....	1
<b>Clasificación de los Residuos. (1)</b> .....	<b>2</b>
Residuos Sólidos Urbanos (RSU). ....	3
Residuos de Manejo Especial (RME).....	4
Residuos Peligrosos (RP).....	5
<b>Generación de Residuos.</b> .....	<b>6</b>
<b>Manejo y disposición final de los residuos sólidos urbanos.</b> .....	<b>18</b>
Barrido.....	19
Recolección y Transporte.....	19
Plantas de selección de residuos.....	21

Transferencia.....	22
<b>Disposición final.....</b>	<b>22</b>
<b>Reciclaje.....</b>	<b>28</b>
<b>Los Residuos Sólidos en la Ciudad de México o Distrito Federal.....</b>	<b>29</b>
<b>Residuos Sólidos por fuente.....</b>	29
Recolección Selectiva.....	31
Barrido Manual y Barrido Mecánico.....	31
Puntos específicos de recolección.....	31
<b>Infraestructura para el manejo de Residuos Sólidos en la Ciudad de México.....</b>	<b>31</b>
Estaciones de transferencia.....	31
Origen de los Residuos.....	31
Destino de los Residuos.....	32
Plantas de Selección.....	36
Plantas de Composta.....	37
Sitios de Disposición Final.....	38
<b>Capítulo 2. Gasificación de RSU.....</b>	<b>41</b>
<b>Capítulo 2. Gasificación de RSU.....</b>	<b>41</b>
<b>Gasificación.....</b>	<b>41</b>
<b>Tecnologías para la Gasificación. (4).....</b>	<b>42</b>
Tecnologías de gasificación para la conversión termoquímica de RSU. (5).....	43
Gasificadores de lecho fijo (corriente ascendente y corriente descendente).....	45
Gasificadores de lecho fluidizado Burbujeante o circulante.....	46
Gasificadores de flujo arrastrado.....	46
Gasificadores de horno giratorio.....	47
Gasificadores de plasma.....	48
<b>El hidrógeno.....</b>	<b>48</b>
<b>El simulador de procesos ASPEN Plus.....</b>	<b>51</b>
Reactores.....	52
Bloque RStoic.....	53
Bloque RYield.....	54
Bloque RGibbs.....	54
Separadores de flujo.....	55
Bloque Flash 2.....	55

Bloque Separador (Sep2 Block) .....	56
<b>Capítulo 3. Simulación del Proceso de Gasificación para la obtención de Hidrógeno en ASPEN Plus.....</b>	<b>58</b>
<b>Proceso de gasificación. ....</b>	<b>58</b>
<b>Influente.....</b>	59
<b>Análisis Último.....</b>	59
<b>Análisis Próximo.....</b>	59
Materia Volátil. ....	60
Ceniza.....	60
Humedad. ....	60
Carbón fijo.....	60
CHAR. ....	60
<b>Efluente. ....</b>	60
<b>Poder Calorífico. ....</b>	61
Poder calorífico superior (PCS o HHV por sus siglas en ingles de High Heating Value). ....	61
Poder calorífico inferior (PCI o LHV por sus siglas en ingles de Low Heating Value). ....	61
<b>Relación de equivalencia. (ER o Equivalence Ratio).....</b>	61
<b>Eficiencia de gas frio. (CGE o Cold Gas Efficiency).....</b>	61
<b>Descripción del Proceso.....</b>	<b>62</b>
<b>Secado.....</b>	62
<b>Pirolisis.....</b>	62
<b>Combustión parcial.....</b>	63
<b>Gasificación.....</b>	63
<b>Proceso en ASPEN plus. ....</b>	<b>64</b>
<b>Elementos no Convencionales.....</b>	65
<b>Reactores. ....</b>	65
<b>Calculadora. ....</b>	66
<b>Descripción del Proceso analizado en ASPEN plus. ....</b>	<b>66</b>
<b>Secado.....</b>	68
<b>Descomposición. ....</b>	70
<b>Combustión parcial y Gasificación. ....</b>	71
<b>Separación de gases.....</b>	72
<b>Descripción del modelo.....</b>	<b>73</b>
<b>Suposiciones del modelo. ....</b>	73

Método de Propiedades físicas.....	73
Validación del modelo.....	74
<b>Capítulo 4. Resultados.....</b>	<b>77</b>
<b>Balance de energía.....</b>	<b>77</b>
Balance de energía de la gasificación con Oxígeno.....	77
Balance de energía de la gasificación con Aire.....	79
Balance de energía de la gasificación con vapor de agua.....	81
<b>Análisis de la temperatura de los gases.....</b>	<b>83</b>
Análisis de la temperatura de los gases de la gasificación con oxígeno.....	83
Análisis de la temperatura de los gases de la gasificación con aire.....	84
Análisis de la temperatura de los gases de la gasificación con vapor de agua.....	84
<b>Análisis de la relación de equivalencia (ER Equivalence Ratio).....</b>	<b>86</b>
Análisis de la relación de equivalencia de la gasificación con oxígeno.....	86
Análisis de la relación de equivalencia de la gasificación con aire.....	87
Análisis de la relación de equivalencia de la gasificación con vapor de agua.....	87
<b>Análisis de la composición del gas de síntesis en el Poder Calorífico.....</b>	<b>89</b>
Análisis de la composición del gas de síntesis en el poder calorífico de la gasificación con oxígeno.....	89
Análisis de la composición del gas de síntesis en el poder calorífico de la gasificación con aire.....	90
Análisis de la composición del gas de síntesis en el poder calorífico de la gasificación con vapor de agua.....	90
<b>Análisis de la relación del poder calorífico de entrada con el poder calorífico de salida con la relación de equivalencia.....</b>	<b>92</b>
Análisis de la relación del poder calorífico de entrada con el poder calorífico de salida con la relación de equivalencia de la gasificación con oxígeno.....	92
Análisis de la relación del poder calorífico de entrada con el poder calorífico de salida con la relación de equivalencia de la gasificación con aire.....	93
Análisis de la relación del poder calorífico de entrada con el poder calorífico de salida con la relación de equivalencia de la gasificación con vapor de agua.....	93
<b>Análisis de producción de hidrógeno entre oxidantes.....</b>	<b>95</b>
<b>Análisis de la eficiencia de gas frío o Cold Gas Efficiency CGE.....</b>	<b>97</b>
Análisis de la eficiencia de gas frío de la gasificación con oxígeno.....	97
Análisis de la eficiencia de gas frío de la gasificación con aire.....	97
Análisis de la eficiencia de gas frío de la gasificación con vapor de agua.....	97

**Conclusiones..... 99**

**Conclusión acerca del balance de energía..... 99**

**Conclusión acerca de la temperatura del gasificador. .... 100**

**Conclusión acerca de la relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER. .... 101**

**Conclusión acerca del poder calorífico..... 101**

**Conclusión acerca de la eficiencia de gas frío o cold gas efficiency (CGE). .... 102**

**Conclusión general. .... 102**

**Referencias ..... 105**

## LISTADO DE FIGURAS.

Figura 1. Gasto final privado, Producto Interno Bruto PIB y generación de RSU en el periodo de 1997 a 2007 en la República Mexicana. ....	7
Figura 2. Generación per cápita de RSU en México. ....	7
Figura 3. Generación de RSU per cápita en países de la OCDE 2006. ....	8
Figura 4. Regionalización para el análisis de generación de RSU y generación per cápita 2007. ....	8
Figura 5. Generación de RSU por región año 2007. ....	9
Figura 6. Generación de RSU por entidad federativa año 2007. ....	10
Figura 7. Contribución al PIB y a la generación de RSU por entidad federativa años 2006. ....	10
Figura 8. Generación de RSU por tipo de localidad en el año 2007. ....	11
Figura 9. Generación de RSU por tipo de localidad en el periodo de tiempo 1997 a 2007. ....	11
Figura 10. Composición de RSU en el año 2007. ....	12
Figura 11. Generación per cápita por región 2012. ....	13
Figura 12. Generación per cápita por tamaño de municipio. ....	14
Figura 13. Composición de residuos por tamaño del municipio al año 2012. ....	14
Figura 14. Composición de RSU por región al año 2012. ....	15
Figura 15. Composición de RSU por subproductos. ....	16
Figura 16. Generación de RSU por entidad Federativa. ....	17
Figura 17. Cantidad y porcentajes de generación de RSU por región. ....	17
Figura 18. Indicadores Nacionales de Generación y Manejo de RSU. ....	18
Figura 19. Diagrama Nacional de Flujo de los RSU. ....	19
Figura 20. Cobertura de recolección por entidad federativa. ....	20
Figura 21. Cobertura de recolección por región. ....	20
Figura 22. Cobertura de recolección por tamaño de municipio. ....	21
Figura 23. Recolección de RSU por entidad federativa. ....	22
Figura 24. Plantas de selección de residuos existentes en el país. ....	24
Figura 25. Distribución de estaciones de transferencia por región. ....	24
Figura 26. Tipo de disposición final de RSU por entidad federativa. ....	25
Figura 27. Disposición final de los RSU en el periodo de tiempo de 1997 a 2007. ....	26
Figura 28. Disposición final de los RSU en rellenos sanitarios por entidad federativa en el año 2007. ....	26
Figura 29. Rellenos sanitarios por entidad federativa en el año 2007. ....	27

Figura 30. Disposición final de RSU en rellenos sanitarios y sitios no controlados por tipo de localidad en el año 2007. Fuente: Residuos SEMARNAT 2007. ....	27
Figura 31. Reciclaje de los RSU en el periodo de tiempo 1997 a 2007. ....	28
Figura 32. Reciclaje de RSU por composición en el año 2007. ....	28
Figura 33. Generación de Residuos por Delegación en la Ciudad de México. ....	30
Figura 34. Residuos Sólidos por fuente en la Ciudad de México. ....	31
Figura 35. Puntos específicos de recolección de Residuos Sólidos en la Ciudad de México. ....	33
Figura 36 A. Origen de los Residuos Sólidos para su procesamiento en la Ciudad de México. ....	34
Figura 37 A. Destino de los Residuos Sólidos en las estaciones de transferencia de la Ciudad de México. ....	35
Figura 38 A. Plantas de selección de Residuos Sólidos en la Ciudad de México, Origen, destino y cantidad de residuos sólidos ingresados. ....	36
Figura 38 B. Plantas de selección de Residuos Sólidos en la Ciudad de México, Origen, destino y cantidad de residuos sólidos ingresados. ....	37
Figura 39. Origen de los residuos sólidos en la Ciudad de México para plantas de composta. ....	38
Figura 40. Cantidad y destino de la composta producida en las plantas de composta de la Ciudad de México. ....	38
Figura 41 A. Origen y cantidad de Residuos Sólidos en los sitios de disposición final de los Residuos Sólidos para la Ciudad de México. ....	39
Figura 41 B. Origen y cantidad de Residuos Sólidos en los sitios de disposición final de los Residuos Sólidos para la Ciudad de México. ....	40
Figura 42. Origen del hidrógeno producido en la actualidad. ....	50
Figura 43. Consumo del hidrógeno y distribución según el tipo de aplicación. ....	50
Figura 44. Reactor RStoic ASPEN plus. ....	53
Figura 45. Tanque Flash en ASPEN plus. ....	55
Figura 46. Bloque separador (Sep 2) ASPEN plus. ....	57
Figura 47. Proceso de Gasificación en ASPEN plus. ....	67
Figura 48. Proceso de Secado en ASPEN plus. ....	69
Figura 50. Reactor de Gasificación en ASPEN plus. ....	72
Figura 51. Separador de Ceniza en ASPEN plus. ....	73

## LISTADO DE TABLAS.

Tabla 1. Clasificación de los RSM (Residuos Sólidos Municipales). .....	4
Tabla 2 Taxonomía de los gasificadores de RSU. ....	44
Tabla 3 Análisis último de los RSU en la Ciudad de México. ....	65
Tabla 4 Reactores utilizados en el proceso de Gasificación para la obtención de hidrógeno. ....	66
Tabla 5 Composición física de los RSU en la Ciudad de México. ....	67
Tabla 6 Análisis Último (wt% base seca) de RSU de la Ciudad de México. ....	68
Tabla 7 Análisis Próximo de RSU de la Ciudad de México. ....	68
Tabla 8 Reacciones de gasificación utilizadas en el software ASPEN plus. ....	71
Tabla 9 Valores de simulaciones de artículos de investigación y el presente estudio. ....	74
Tabla 10. Diferencias de los valores obtenidos de las simulaciones de otros estudios con el presente trabajo. ....	74
Tabla 11 Balance de energía de la gasificación con oxígeno como agente de gasificación. ....	78
Tabla 12 Balance de energía de la gasificación con aire como agente de gasificación. ....	80
Tabla 13 Balance de energía de la gasificación con vapor de agua como agente de gasificación. ....	82

## LISTADO DE GRÁFICAS.

Gráfica 1. Análisis de sensibilidad de la gasificación comparado.....	75
Gráfica 2 Balance de energía en el gasificador con oxígeno como agente de gasificación.....	79
Gráfica 3 Balance de energía en el gasificador con aire como agente de gasificación.....	81
Gráfica 4 Balance de energía en el gasificador con vapor de agua como agente de gasificación.....	83
Gráfica 5 Temperatura del gasificador vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante al oxígeno puro. ....	85
Gráfica 6 Temperatura del gasificador vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante al aire atmosférico.....	85
Gráfica 7 Temperatura del gasificador vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante vapor de agua. ....	86
Gráfica 8 Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante al oxígeno puro.....	88
Gráfica 9 Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante al aire atmosférico.....	88
Gráfica 10 Relación vapor combustible real vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante vapor de agua. ....	89
Gráfica 11 Poder Calorífico Superior PCS vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente al oxígeno puro.....	91
Gráfica 12 Poder Calorífico Superior PCS vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente al aire atmosférico. ....	91
Gráfica 13 Poder Calorífico Superior PCS vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante el vapor de agua. ....	92
Gráfica 14 Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs la relación del poder calorífico de salida con el poder calorífico de entrada en la gasificación con oxígeno. ....	94
Gráfica 15 Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs la relación del poder calorífico de salida con el poder calorífico de entrada en la gasificación con aire. ....	94
Gráfica 16 Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs la relación del poder calorífico de salida con el poder calorífico de entrada en la gasificación con vapor. ....	95
Gráfica 17 Temperatura de Gasificación vs composición molar de producción de hidrógeno en el gasificador con sus tres diferentes agentes gasificantes.....	96

Gráfica 18 Flujo de Agente Gasificante vs composición molar de producción de hidrógeno en el gasificador. ....	96
Gráfica 19 Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs Eficiencia de Gas Frio o Cold Gas Efficiency CGE en la gasificación con oxígeno. ....	98
Gráfica 20 Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs Eficiencia de Gas Frio o Cold Gas Efficiency CGE en la gasificación con aire. ....	98
Gráfica 21 Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs Eficiencia de Gas Frio o Cold Gas Efficiency CGE en la gasificación con vapor. ....	99

## **CAPÍTULO 1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) EN MÉXICO.**

En este capítulo se muestran los antecedentes, la cronología histórica, la clasificación de los residuos sólidos, ya una vez clasificados se hace énfasis en los Residuos Sólidos Urbanos o RSU (Municipal Solid Waste o MSW en inglés) teniendo como puntos principales, la recolección, la composición física y la disposición de los mismos a nivel nacional.

### **Antecedentes.**

México es un país que cuenta con 1 964 375 km<sup>2</sup> de superficie, tiene una población 112 336 538 habitantes (en el año 2010) y se tiene una tasa media anual de crecimiento de la población de 1.4% y del total de esta población el 77.8% es población urbana lo que denota que vive en centros donde hay más de 2500 habitantes datos según INEGI.

A través del tiempo la población urbana ha aumentado en un gran porcentaje y también los residuos generados por la misma, estos residuos son conocidos como Residuos Sólidos (RS).

Los Residuos Sólidos (RS) también como la sociedad se han modificado tanto la cantidad producida por persona, la calidad y tipo de residuos ya que consumimos productos diferentes a través del tiempo ya que nuestras necesidades se van viendo modificadas por un cambio en las comodidades y necesidades de una mejora en la vida del ser humano.

### **Cronología Histórica.**

El control de los Residuos Sólidos (RS) se inició en la época precortesiana el 15 de Julio de 1891 ya que es la fecha que se promulga el primer Código Sanitario elaborado por el Consejo Superior de Salubridad.

Los primeros estudios sobre RS se realizaron en la década de los años 20`s por parte de la Comisión Constructora a cargo del Ing. Miguel Ángel de Quevedo quien estudió la posibilidad de la pulverización de los residuos para darle uso agrícola, también hizo estudios de saneamiento en la Ciudad de México.

En la década de los 60`s se hicieron los primeros intentos de control de los RS cuando la dirección de Ingeniería Sanitaria de la Secretaría de Salubridad y Asistencia (CCISSA) la cual tenía la finalidad de un programa de recolección y disposición de los RSU y en consecuencia a esto en la ciudad de Aguascalientes se diseñó el primer relleno sanitario bajo la dirección del CCISSA con el cual se tuvieron planes integrales de recolección disposición.

En el año de 1981 se crea la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente (SMA) de la misma Secretaria de Salubridad y Asistencia ya creada en 1972. Esta subsecretaria desarrolló programas con

apoyo crediticio del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Con este programa se desarrollaron proyectos para manejo y disposición final de los RS en varias ciudades de la República Mexicana.

A finales de la década de los 70's y hasta 1982 en la Dirección de Ecología Urbana de la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP) se elaboraron normas técnicas para el control de los RSU. Con la creación de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) en 1982 el control de los RSU se le da a la Subsecretaría de Ecología la cual elaboró proyectos de rellenos sanitarios en ciudades con población mayor a 100 000 habitantes. También con ello se elaboraron manuales de diseño de rellenos sanitarios y diseño de rutas programadas de recolección mediante simulaciones en computadora, así como proyectos para el confinamiento de residuos industriales.

En 1992 desaparece la SEDUE y se crea la Secretaría de Desarrollo Social, (SEDESOL) la cual incluye en su estructura al Instituto Nacional de Ecología (INE). La SEDESOL continúa brindando apoyo a los municipios, a través del desarrollo de proyectos ejecutivos y del financiamiento para la construcción de infraestructura para el control de los RS y la construcción y operación de rellenos sanitarios, hasta la fecha.

La Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, (SEMARNAP), se crea en 1994 incorporando al INE y a los demás órganos que en la SEDESOL se ocupaban de cuestiones ambientales. En este contexto, el INE asume la responsabilidad del desarrollo de la normatividad de los residuos sólidos municipales y en el año de 1996, promulga la Norma Oficial Mexicana que establece los requerimientos para la selección de sitios para ubicar rellenos sanitarios.

## **Clasificación de los Residuos. (1)**

México cuenta con una ley de clasificación de Residuos que es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. En esta Ley se dividen los Residuos en tres tipos: La Secretaría de Medio Ambiente agrupa y sub-clasifica los residuos como Residuos Peligrosos (RP), Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y Residuos de Manejo Especial (RME) en categorías.

Como nuestro objetivo de trabajo es estudiar los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) la clasificación de los mismos es la siguiente de acuerdo al Instituto Nacional de Ecología:

“La gran diversidad y heterogeneidad de los Residuos Sólidos Municipales (RSM) dificulta el establecimiento de criterios claros de clasificación y por tanto, de manejo de los mismos”. Este criterio lo utiliza el Instituto Nacional de Ecología para la clasificación de los residuos.

## Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

Los Residuos Sólidos Urbanos son aquéllos generados en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (por ejemplo, de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques). Proviene también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias, y los resultantes de las vías y lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole (DOF, 2003).

Los RSU son un problema que se incrementa con el paso del tiempo dado el crecimiento poblacional, falta de acciones de reciclaje y mayor consumo, entre otras.

En la tabla 1 se plantea una clasificación en la que se utiliza la fuente genérica del origen del residuo, las fuentes específicas y los residuos que son generados en esas fuentes, desglosando los residuos comunes de acuerdo con sus propiedades físicas que permiten identificar las posibles implicaciones de su manejo y confinamiento. No se incluyen en el cuadro pero deben considerarse los residuos peligrosos que es factible encontrar en los Residuos Sólidos Municipales y que reúnen las características que señala la normatividad correspondiente.

<b>Clasificación de los residuos sólidos municipales.</b>		
Fuente	Origen específico	Tipos de residuos
1. Domiciliarios	Casas habitación	Clasificación de residuos comunes por sus propiedades físicas
2. Institucionales	Escuelas, Institutos y Universidades Museos. Iglesias. Oficinas de gobierno. Bancos. Reclusorios.	Materiales inertes Vidrio. Plástico. Metales. Lozas y Cerámicas. Tierras. Cenizas.
3. Áreas y vías públicas	Calles y avenidas. Carreteras federales o estatales. Parques y jardines. Zoológicos. Playas. Áreas arqueológicas. Parques nacionales.	Materiales fermentables Residuos alimenticios. Residuos de jardinería. Hueso. Flores (desechos).

4. Comercial y de servicios.	Balnearios. Circos. Cines. Teatros. Estadios. Hipódromos y galgódromos. Parques deportivos. Autódromos. Velódromos. Plazas de toros. Frontón. Mercados, tianguis y centros de abasto. Hoteles y moteles. Oficinas. Rastros. Panteones. Restaurantes. Tiendas. Terminales: Marítimas. Terrestres. Aéreas.	Materiales combustibles Algodón Papel. Cartón. Tetrapack y tetrabrik Textiles naturales. Textiles sintéticos. Pañales desechables. Madera. Cuero. Hule.
Construcción y demolición		Otros: Cascajo

**Tabla 1. Clasificación de los RSM (Residuos Sólidos Municipales).**

**Fuente: - INECC “La situación de los residuos sólidos en México” 2007.**

### **Residuos de Manejo Especial (RME).**

Los residuos de manejo especial implicaran cambios en los próximos años para los Sistemas de Aseo Urbano ya que aún no se cuenta con infraestructura para su tratamiento y algunos de ellos se van modificando a la par que se modifica la tecnología de producción.

Los Residuos de Manejo Especial (RME) se definieron en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2003). En la ley se les menciona como aquéllos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como Residuos Sólidos Urbanos, o que son producidos por grandes generadores de Residuos Sólidos Urbanos.

Según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, los residuos de manejo especial son aquellos provenientes de:

- Las rocas o los productos de su descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción o se destinen para este fin, así como los productos derivados de la descomposición de las rocas, excluidos de la competencia federal conforme a las fracciones IV y V del artículo 5 de la Ley Minera.
- Los servicios de salud, generados por los establecimientos que realicen actividades médico-asistenciales a las poblaciones humanas o animales, centros de investigación, con excepción de los biológico-infecciosos.
- Las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades.
- Los servicios de transporte, así como los generados a consecuencia de las actividades que se realizan en puertos, aeropuertos, terminales ferroviarias y portuarias y en las aduanas.
- Tratamiento de aguas residuales (Lodos).
- Los residuos de tiendas departamentales o centros comerciales generados en grandes volúmenes.
- Residuos generados por la construcción, mantenimiento y demolición en general.
- Los residuos tecnológicos provenientes de las industrias de la informática, fabricantes de productos electrónicos o de vehículos automotores y otros que al transcurrir su vida útil, por sus características, requieren de un manejo específico.
- Otros que determine la SEMARNAT de común acuerdo con las entidades federativas y municipios que así lo convengan para facilitar su gestión integral.

### **Residuos Peligrosos (RP).**

Una consecuencia del uso de sustancias químicas y de materiales peligrosos tanto en los procesos productivos como en el uso doméstico, es la generación de residuos peligrosos (RP). Además, una vez finalizada la vida útil de un producto, éste puede transformarse en un residuo peligroso afectado debido a sus componentes.

Para que un residuo se considere peligroso, debe poseer alguna de las seis características de peligrosidad CRETIB: corrosividad (C), reactividad (R), explosividad (E), toxicidad (T), inflamabilidad (I) o ser biológico-infeccioso (B).

## **Generación de Residuos.**

La generación de RSU va cambiando con el tiempo ya que los residuos dependen mucho de lo que se consume actualmente, y como los materiales que se utilizan para empacar, para productos que consumimos y para productos que usamos van cambiando conforme la tecnología avanza esto se ve reflejado en los residuos que vamos generando a través del tiempo, aunque con los residuos orgánicos solo dependen de la zona y de la cantidad que se consumen.

Un estudio hecho por la SEMARNAT para los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) nos arroja datos que son necesarios conocerlos ya que con esto podemos hacer referencia al tipo de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y lo que podemos aprovechar de ellos.

La SEMARNAT en 2007 estima una generación de 36.9 millones de toneladas, lo que equivale a una producción diaria de aproximadamente 101 mil toneladas. Esta cifra se ha incrementado notablemente en los últimos años, debida básicamente al crecimiento urbano, al desarrollo industrial, a las modificaciones tecnológicas y al cambio en los patrones de consumo de la población. Ejemplo de ello es que en el transcurso de los últimos diez años, la generación total de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se incrementó 26%, paralelamente al crecimiento del producto interno bruto (PIB) y al gasto de la población; esto lo podemos ver en la figura 1 donde se ven reflejados la generación de residuos, el PIB y el gasto final privado. De esto podemos concluir que mientras tengamos crecimiento económico se van a ir incrementando los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que generamos como país y que también se van a ir modificando conforme el tiempo y la tecnología cambien.

A nivel de los habitantes del país, la generación per cápita diaria creció de 300 gramos en 1950, a casi un kilogramo en 2007. En términos anuales, la generación per cápita se incrementó en promedio 4 kilogramos por año entre 1997 y 2007, alcanzando los 349 kilogramos por habitante por año en el 2007 (ver figura 2). Considerando a los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), en 2006 la generación per cápita nacional (336 kg/hab/año) resultó 39% menor al promedio de los países que la componen (550 kg/hab/año; Figura 3).

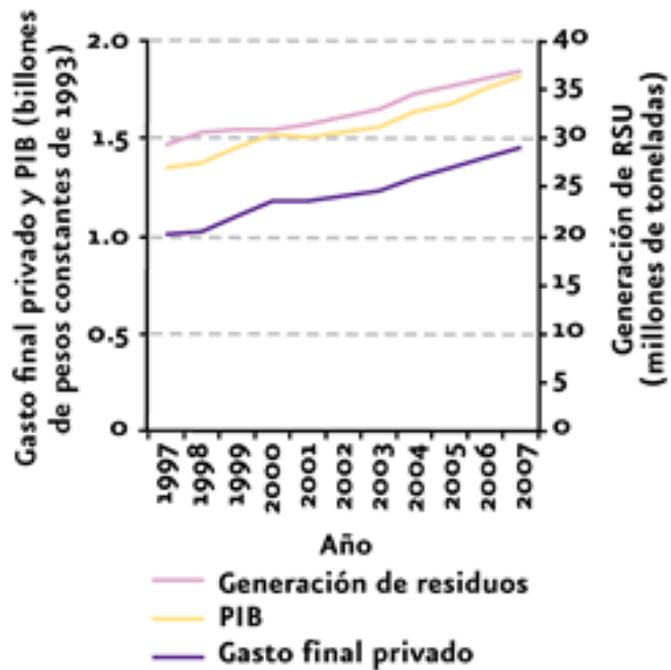


Figura 1. Gasto final privado, Producto Interno Bruto PIB y generación de RSU en el periodo de 1997 a 2007 en la República Mexicana.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

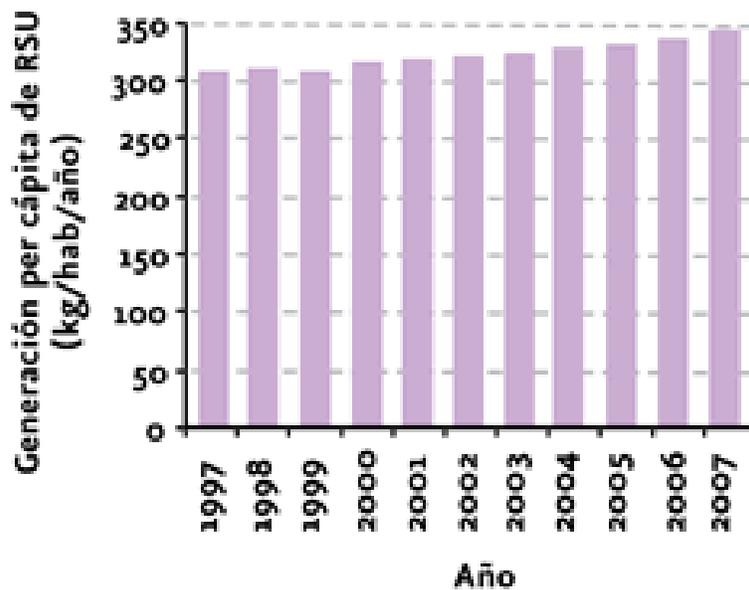


Figura 2. Generación per cápita de RSU en México.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

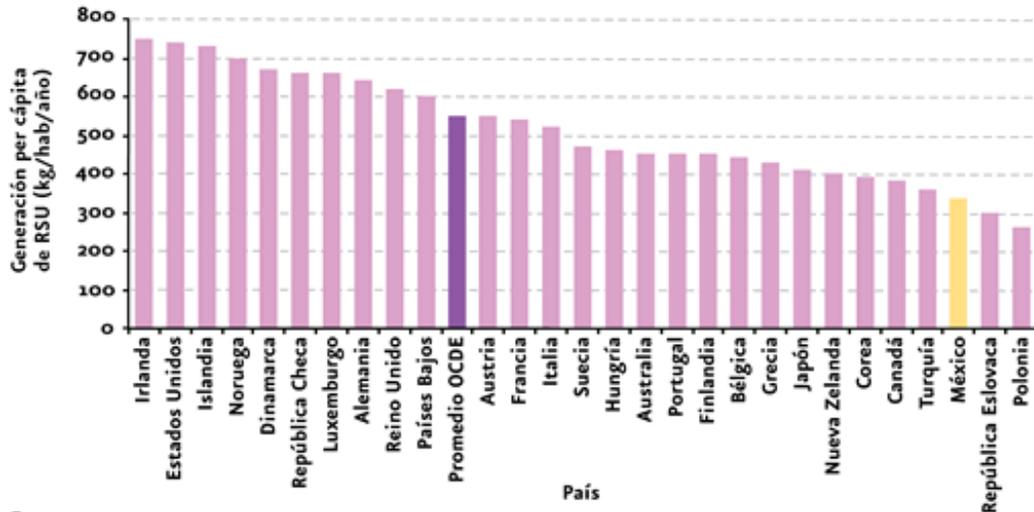


Figura 3. Generación de RSU per cápita en países de la OCDE 2006.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

La generación per cápita muestra diferencias importantes entre regiones y entidades federativas del país, debidas básicamente a la influencia de factores culturales, niveles de ingreso y a la dinámica del movimiento hacia los centros urbanos, entre otros. Si se considera la regionalización de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) para el análisis de la generación residuos, en 2007, el Distrito Federal y la Frontera Norte registraron las mayores generaciones de RSU per cápita, con cerca de 1.4 y 1.1 kilogramos al día, respectivamente, mientras que los habitantes de otras zonas, como la región Sur, generaron en promedio menos de un kilogramo al día (ver Figura 4).

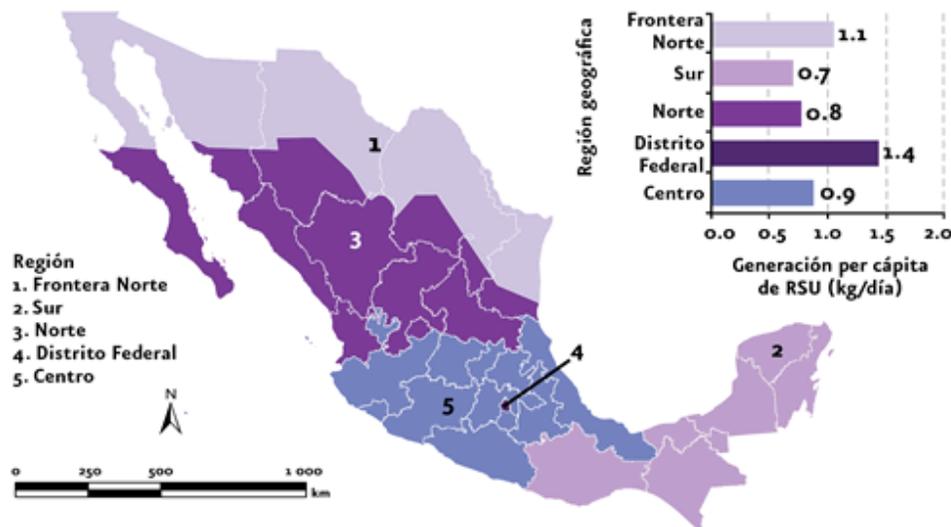


Figura 4. Regionalización para el análisis de generación de RSU y generación per cápita 2007.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

En cuanto a la generación total de residuos, también existen diferencias importantes por región. Por ejemplo, la región Centro contribuye con la mitad de la generación de los RSU en el país, seguida por la región de la Frontera Norte (16% del total) y el Distrito Federal (13 %); (Figura 5). En el periodo 1997 a 2007, las regiones Centro, Sur y el Distrito Federal aumentaron su generación de residuos en un 33%, 26% y 13%, respectivamente. Casos notables fueron los de la región de la Frontera Norte y la región Norte, que en el mismo periodo aumentaron su generación, en el primer caso, casi tres veces (pasando de más de 2 mil toneladas en 1997 a cerca de 6 mil en 2007) y, en el segundo caso, disminuyendo alrededor de 33%.

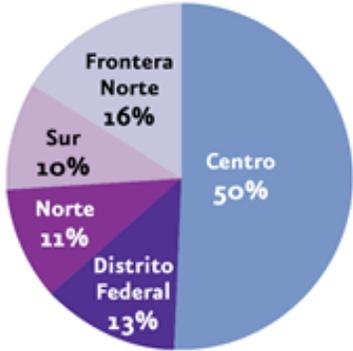


Figura 5. Generación de RSU por región año 2007.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

En 2007, las entidades que generaron mayores volúmenes de RSU fueron el Estado de México, Distrito Federal y Jalisco, mientras que Colima, Baja California Sur, Campeche y Nayarit registraron los menores volúmenes (ver figura 6). Si se analiza la contribución relativa al producto interno bruto nacional de los estados, puede observarse que guarda una relación lineal positiva con la contribución a la generación nacional de RSU (ver figura 7). Sin embargo, existen entidades como el Estado de México y el Distrito Federal, cuya contribución a la producción total nacional de RSU se aparta significativamente de la tendencia que siguen el resto de las entidades.

Si se considera la generación de residuos de acuerdo al tamaño de las localidades, se observa que aquellas con una población menor a los 15 mil habitantes (las llamadas “rurales” o “semiurbanas”, y que albergan 37% de la población del país) generaron el 13.6% del volumen nacional producido, mientras que las zonas metropolitanas (con más de un millón de habitantes) contribuyeron con 44.9% de los residuos totales (ver figura 8). La evolución de la generación de residuos por tipo de localidad entre 1997 y 2007 muestra que las zonas metropolitanas incrementaron 48% el volumen de generación, mientras que las ciudades pequeñas lo hicieron en 45% y las rurales o semiurbanas en

15% (ver figura 9). Las ciudades medias prácticamente no aumentaron el volumen de residuos generados durante este periodo (ver figura 9).

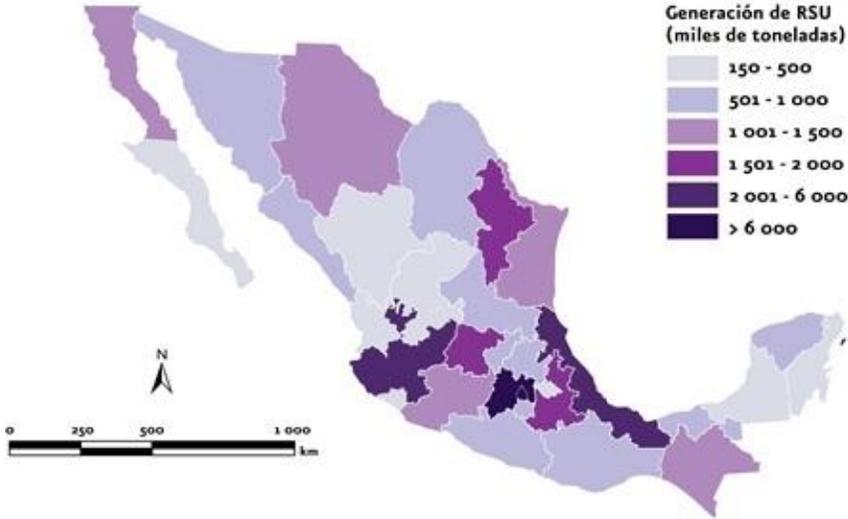


Figura 6. Generación de RSU por entidad federativa año 2007.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

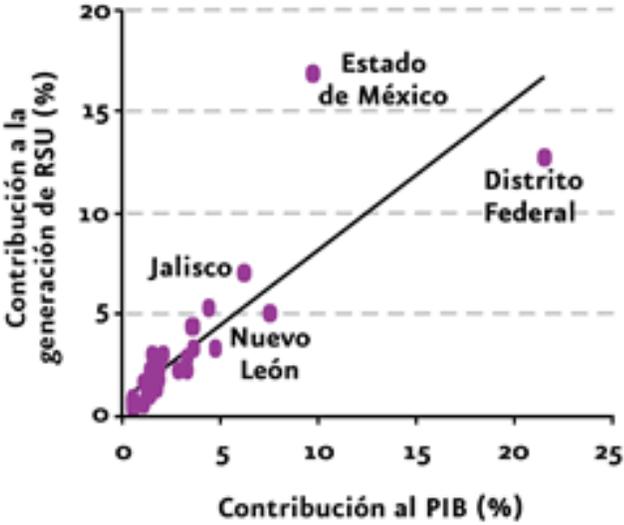


Figura 7. Contribución al PIB y a la generación de RSU por entidad federativa años 2006.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

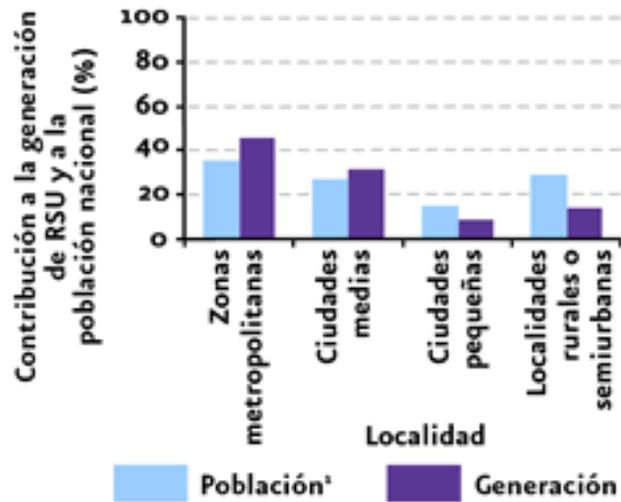


Figura 8. Generación de RSU por tipo de localidad en el año 2007.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

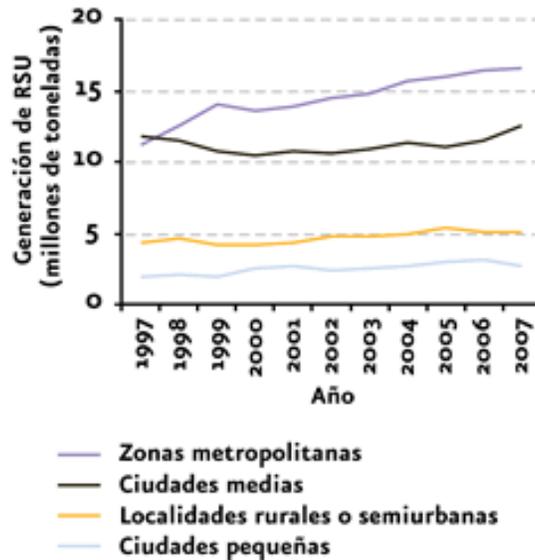


Figura 9. Generación de RSU por tipo de localidad en el periodo de tiempo 1997 a 2007.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

La composición de los residuos también ha cambiado de manera importante en el tiempo a nivel nacional. En general, la composición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) depende, entre otros factores, de los patrones de consumo de la población. Se ha encontrado que existe una correlación entre la composición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) generados y las condiciones económicas de los países: aquéllos con menores ingresos generan menos residuos y en sus componentes

predomina la materia orgánica, en contraste con los países con mayores ingresos. El caso de México ilustra la transformación entre ambos tipos de economías: en la década de los 50, el porcentaje de residuos orgánicos en la basura oscilaba entre 65% y 70% de su volumen, mientras que para 2007, esta cifra se redujo al 50% (ver figura 10). En esta última fecha, 32.3% de los RSU generados eran potencialmente reciclables, destacando el papel y cartón (14.9%), vidrio (6.4%), plástico (6%), metal (3.5%) y textiles (1.5%).

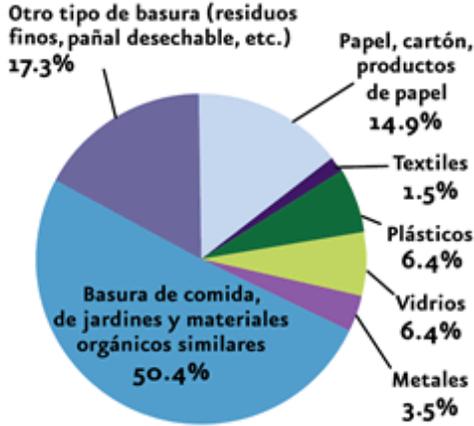


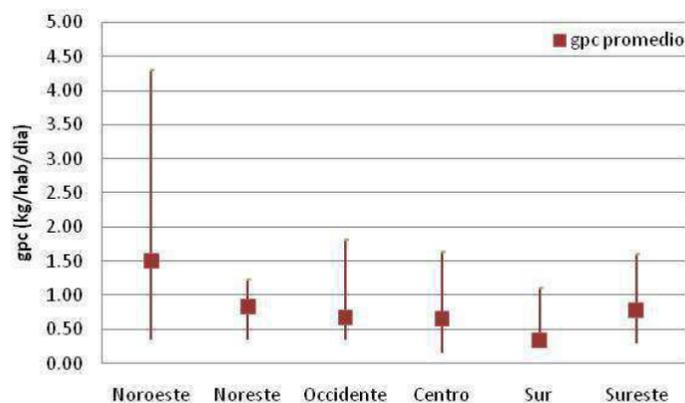
Figura 10. Composición de RSU en el año 2007.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

Las cifras actuales sobre la generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) a nivel nacional presentan limitaciones importantes, básicamente porque no se trata de mediciones directas, sino de estimaciones. La estimación de la generación nacional se calcula, conforme a lo establecido en la norma NMX-AA-61-1985 sobre la determinación de la Generación de Residuos Sólidos, con base en la generación promedio de residuos sólidos por habitante (medida en kg/hab/día), a partir de la información obtenida de muestreos aleatorios en campo, con duración de ocho días, para cada uno de los estratos socioeconómicos de la población. A partir de las estimaciones de generación per cápita puede calcularse la generación diaria y un estimado anual a nivel nacional.

Un estudio aún más reciente que revela el INECC y la SEMARNAT (2012) nos proporciona información confiable ya que fue un estudio hecho por varias dependencias en conjunto con el gobierno. Este estudio nos dice que los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en el país son generados de manera diferente geográficamente hablando. La SEMARNAT y el INECC regionalizaron el país de forma diferente a lo que hace la SEDESOL para un análisis de la generación de residuos, teniendo las regiones Noroeste (Baja California Norte, Baja California Sur, Sinaloa y Sonora), la región Noreste (Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Tamaulipas), la región Occidente (Aguascalientes,

Colima, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas), la región Centro (Estado de México, Hidalgo, Morelos, Puebla, Tlaxcala y Distrito Federal), la región Sur (Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Veracruz) y la región Sureste (Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Yucatán). En la figura 11 podemos observar la generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) por región en la cual resalta que la región Noroeste es la que tiene mayor generación per cápita según SEMARNAT y el INEEC en un estudio realizado en los últimos años, en esta figura podemos observar que la generación per cápita es mayor en la región Noroeste del país dejando muy por detrás a las demás regiones y en último lugar podemos ver que la región Sur es la que menor generación per cápita tiene. El mayor valor de generación lo tiene la región Noroeste con un índice de 1.514, Noreste con 0.839, Sureste con 0.777, Occidente con 0.669, Centro con 0.655 y Sur con 0.332 [kg/hab/día].



**Figura 11. Generación per cápita por región 2012.**

**Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.**

En la figura 12 podemos observar que los municipios con mayor generación per cápita de RSU son los municipios con mayor número de habitantes y mientras menos habitantes se tengan menor es el número de residuos generados, la generación per cápita entonces si depende de la cantidad de habitantes y del tipo de consumos que tienen los mismos y las economías que existen en las mismas regiones. En la figura se puede observar que los promedios van disminuyendo conforme el tamaño del municipio se va modificando teniendo un comportamiento de mayor a menor.

En la figura 13 podemos observar la composición de residuos por tamaño de municipio teniendo como mayoritarios los residuos susceptibles de aprovechamiento, en segundo lugar los residuos orgánicos y por ultimo otro tipo de residuos que vienen referidos en la Figura 13. También se puede observar en la figura que en los municipios con más de 100 mil habitantes los residuos susceptibles a aprovechamiento son mayores y que los residuos orgánicos en todos los tipos de municipios con de gran importancia. Los residuos orgánicos en promedio se generan entre el intervalo de 27.86% y

43.29% dependiendo del número de habitantes de los municipios y el mayor porcentaje se presenta en las localidades de 30 a 40 mil habitantes. Los residuos susceptibles de aprovechamiento varían entre 33.23% y 44.49% y el mayor porcentaje se origina en localidades de 50 a 100 mil habitantes y los residuos restantes denominados “otros” corresponden entre un 16.13% y 30.18% y las localidades con menos de 10 mil habitantes son las que presentan el mayor porcentaje.

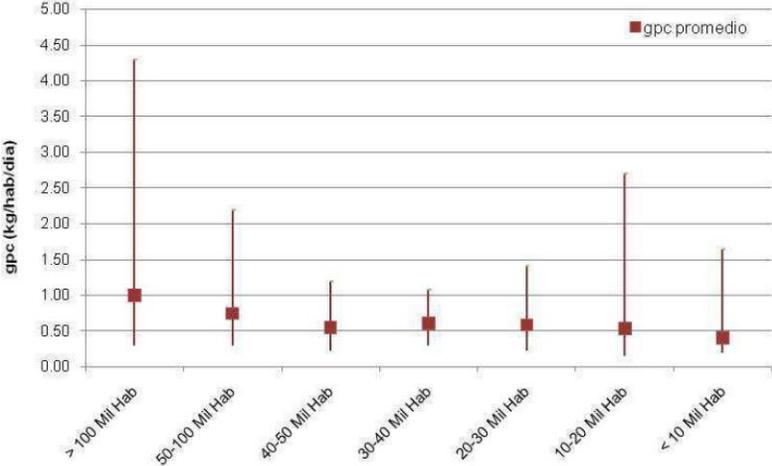


Figura 12. Generación per cápita por tamaño de municipio.

Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.

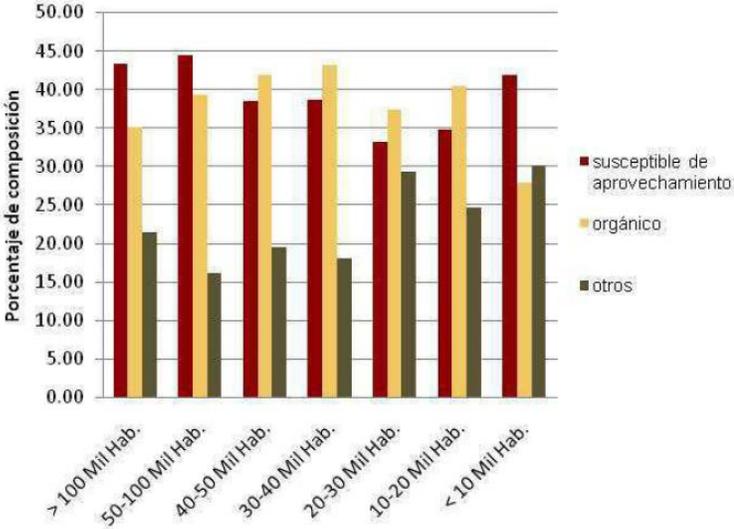


Figura 13. Composición de residuos por tamaño del municipio al año 2012.

Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.

En un análisis por región podemos observar que los residuos orgánicos están comprendidos entre el 22.83 y 42.98%, el porcentaje mayor de orgánicos se encuentra presente en la región Noreste. La

región Noroeste es quien presenta el porcentaje más alto de residuos susceptibles de aprovechamiento con un 54.79% y la región sureste es quien presenta el menor porcentaje con el 33.75%. Otros residuos varían ente el 13.95% y el 38.57% del total, quien genera el porcentaje mayor es la región sureste y el menor la región Noroeste.

En la figura 14 podemos observar la composición de RSU por región, en la región Centro que es la que mayor cantidad genera residuos se generan de forma representativa los residuos orgánicos al igual que en la región Noreste, en la región Noroeste se tienen mayor cantidad de residuos susceptibles de aprovechamiento ya que es una zona de diferente industrialización del país.

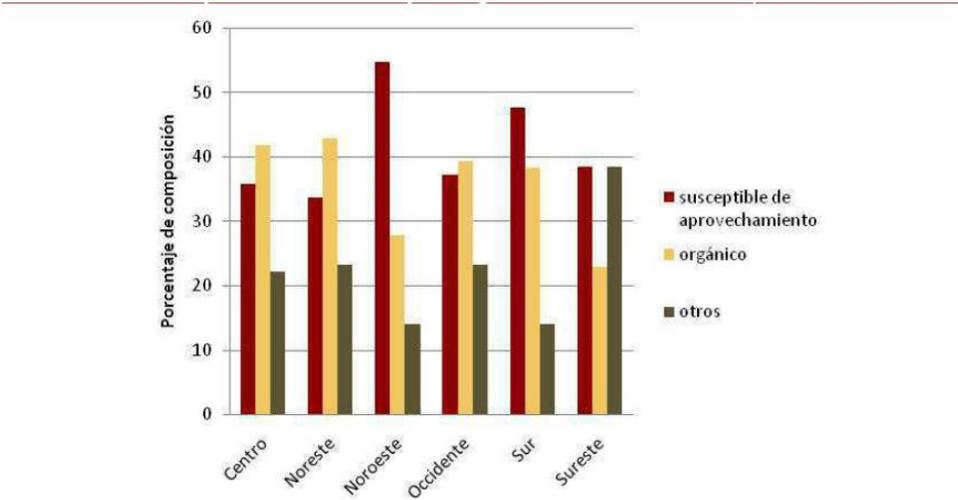


Figura 14. Composición de RSU por región al año 2012.

Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.

En la figura 15 podemos observar los tipos de RSU, divididos en residuos por categorías las cuales son: Residuos Susceptibles de Aprovechamiento, Residuos Orgánicos y Otros residuos, los cuales se subdividen en subproductos y cada subproducto tiene un porcentaje de acuerdo a la generación que se tiene por cada uno dentro del país siendo este porcentaje un promedio de cada región. También podemos observar que la mayor parte de residuos vienen de los residuos orgánicos como subproducto los residuos alimenticios y los residuos de jardinería, también, los residuos susceptibles a aprovechamiento como el cartón, el papel y el plástico rígido y de película tienen una participación importante en la composición de los RSU.

Categoría	Subproductos	Porcentaje
Susceptibles de aprovechamiento 39.57%	Cartón	6.54
	Papel	6.20
	Material ferroso	2.09
	Material no ferroso	0.60
	Plástico rígido y de película	7.22
	Envase de cartón encerado	1.50
	Fibras sintéticas	0.90
	Poliestireno expandido	1.65
	Hule	1.21
	Lata	2.28
	Vidrio de color	2.55
	Vidrio transparente	4.03
	Poliuretano	2.80
	Orgánicos 37.97 %	Cuero
Fibra dura vegetal		0.67
Residuos alimenticios		25.57
Hueso		0.59
Residuos de jardinería		9.38
Madera		1.25
Residuo fino		3.76
Otros 22.46%	Pañal desechable	6.52
	Algodón	0.70
	Trapo	3.57
	Loza y cerámica	0.55
	Material de construcción	1.46
	Varios	5.90
<b>Total</b>		<b>100.00</b>

**Figura 15. Composición de RSU por subproductos.**

**Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.**

En la figura 16 podemos observar la generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) por entidad federativa destacando por encima de todos el Estado de México y el Distrito Federal y en últimos lugares los estados de Campeche, Colima y Nayarit; esta tabla se obtiene a partir de los datos de generación per cápita y el número de habitantes reportado por el INEGI en 2010, se determinó la generación de RSU que son 102,895 toneladas por día. También en la misma figura se muestra la generación de RSU por entidad, que indica que entre el Estado de México, el Distrito Federal y Jalisco generan el 33% de los RSU del país, mientras que los estados de Campeche, Colima y Nayarit presentan los valores más bajos y generan el 2% del total. Cabe señalar que 26 entidades federativas de 32 (82%), presentan valores de generación de residuos por debajo de 4,000 toneladas al día. Los porcentajes y cantidad de generación de RSU por región se muestran en la Figura 17, en la cual se

puede observar que la mayor generación de RSU corresponde a las regiones Centro y Occidente, con el 32 y 23%, respectivamente y las regiones Noroeste y Sureste son las que menor cantidad de generación de RSU tienen.

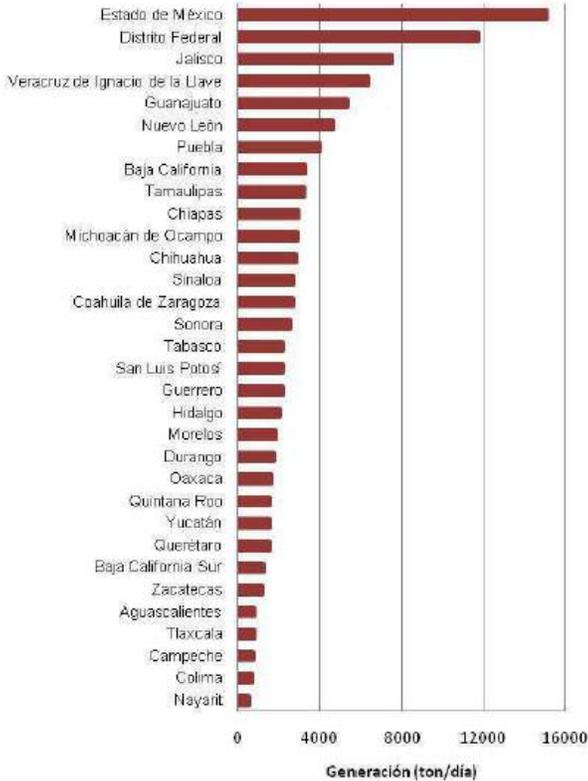


Figura 16. Generación de RSU por entidad Federativa.

Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.

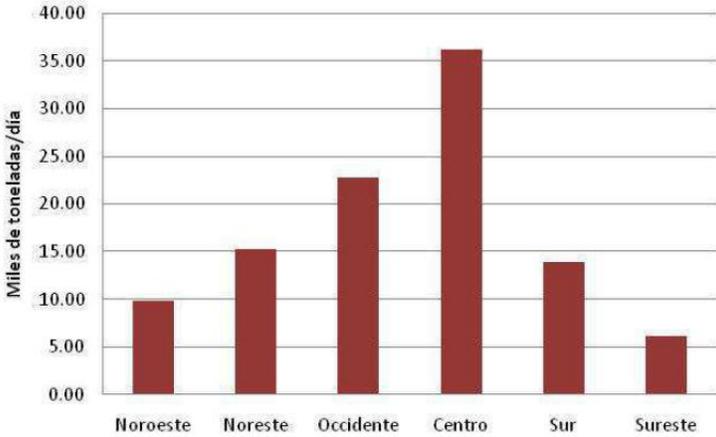


Figura 17. Cantidad y porcentajes de generación de RSU por región.

Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.

## Manejo y disposición final de los residuos sólidos urbanos.

El manejo de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) comprende diferentes fases, que van desde su generación, almacenamiento, transporte y tratamiento, hasta su disposición en diversos sitios. Algunas de ellas involucran aspectos importantes del ciclo de vida de los residuos, tales como la recolección, el reciclaje y la disposición final, las cuales se tratan con más detalle en los siguientes párrafos. En la figura 18 podemos observar las diferentes actividades que se realizan para el manejo de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en México como lo es la generación, la recolección, su tratamiento, si es reciclado, si no tiene una disposición conocida, etc.

Actividad	Cantidad	Unidad	Porcentaje
Generación	102,895.00	Ton/día	100.00
Recolección de RSU	86,356.92	Ton/día	83.93
Recolección mixta	76,984.68	Ton/día	74.82
Recolección selectiva	9,372.24	Ton/día	9.11
Estaciones de Transferencia	86.00	Unidades	NA
Tratamiento	98.00	Plantas de composta	NA
Pepena en recolección	3,823.00	Ton/día	3.71*
Pepena en tiradero a cielo abierto	370.05	Ton/día	0.36*
Acopio industrial	4,366.00	Ton/día	4.24*
Plantas de selección	17.00	Unidades	NA
Plantas de selección	1,346.00	Ton/día	1.31*
Reciclaje	9,904.03	Ton/día	9.63*
Disposición en relleno sanitario y sitio controlado	62,287.67	Ton/día	60.54
Disposición en tiradero a cielo abierto	16,395.13	Ton/día	15.93
Disposición desconocida	2,132.73	Ton/día	2.07
Camiones con compactador	4,864.00	Unidades	34.01
Camiones con caja abierta	8,829.00	Unidades	61.74
Camiones de otro tipo	608.00	Unidades	4.25

**Figura 18. Indicadores Nacionales de Generación y Manejo de RSU.**

**Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.**

En la figura 19 podemos observar el diagrama Nacional de Flujo de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), el diagrama incluye desde la generación, la recolección y de esa recolección como son tratados los residuos hasta llegar a su disposición final. También se puede observar que los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) no llegan a plantas de separación con un porcentaje de 1.31%, solo el 9.63% es reciclado y que solo el 60.54% de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es llevado a un Relleno Sanitario o sitios controlados.

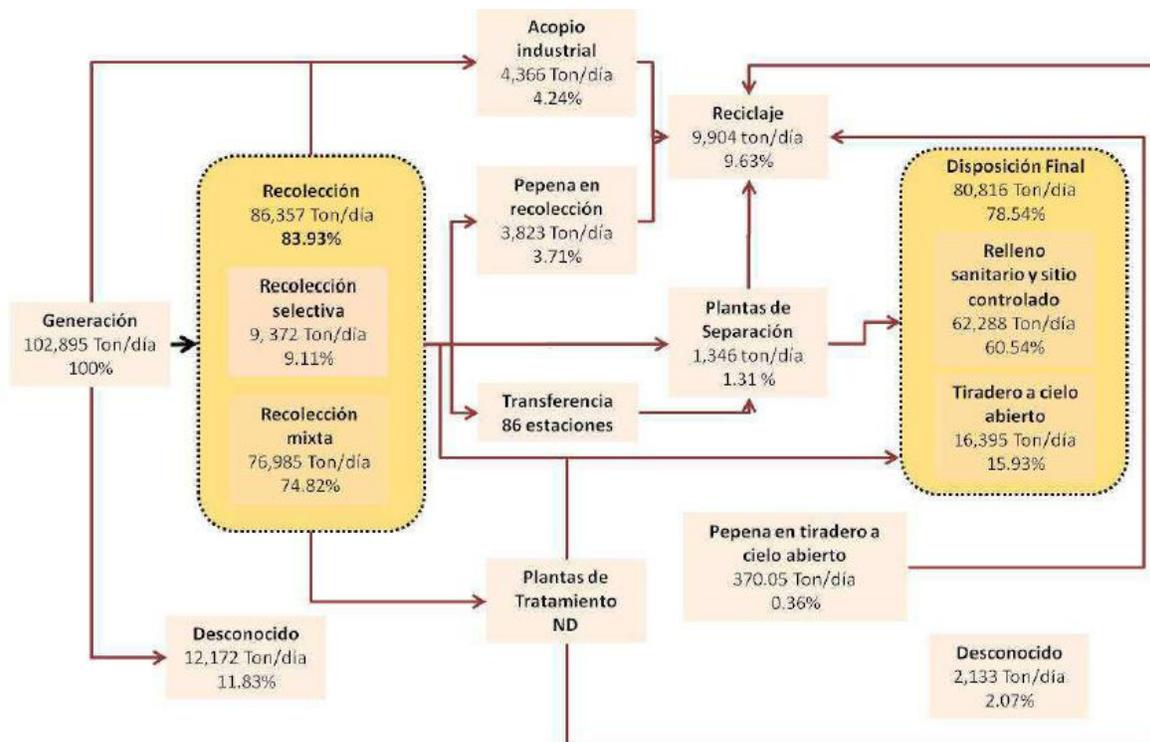


Figura 19. Diagrama Nacional de Flujo de los RSU.

Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.

## Barrido.

En el país no se ha podido calcular indicadores de barrido ya que solamente algunos municipios reportan características de barrido pero no son cantidad representativa ya que son datos heterogéneos pero en lo reportado se tiene que los costos de barrido van de \$34.32 a \$486.46 pesos por kilómetro.

## Recolección y Transporte.

Esta es la actividad más importante en lo que concierne a los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). La cobertura nacional de recolección es de 83.93%. En la figura 20 podemos observar el comportamiento de este indicador en cada entidad federativa, en la figura cabe resaltar los estados de Chihuahua, Colima, Aguascalientes, Distrito Federal, Nayarit y Quintana Roo que manifiestan un 100% de recolección de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), por el contrario estados como Puebla, Baja California Sur y Guerrero reportan un índice de cobertura de recolección menor al 50%.

Con respecto a la cobertura de recolección por región podemos observar que la región con mayor cobertura corresponde a la región Noreste (94.47%) y la menor corresponde a la región Sur (68.73%). En la figura 21 podemos observar la gráfica de las regiones y los porcentajes de cobertura de recolección por cada región.

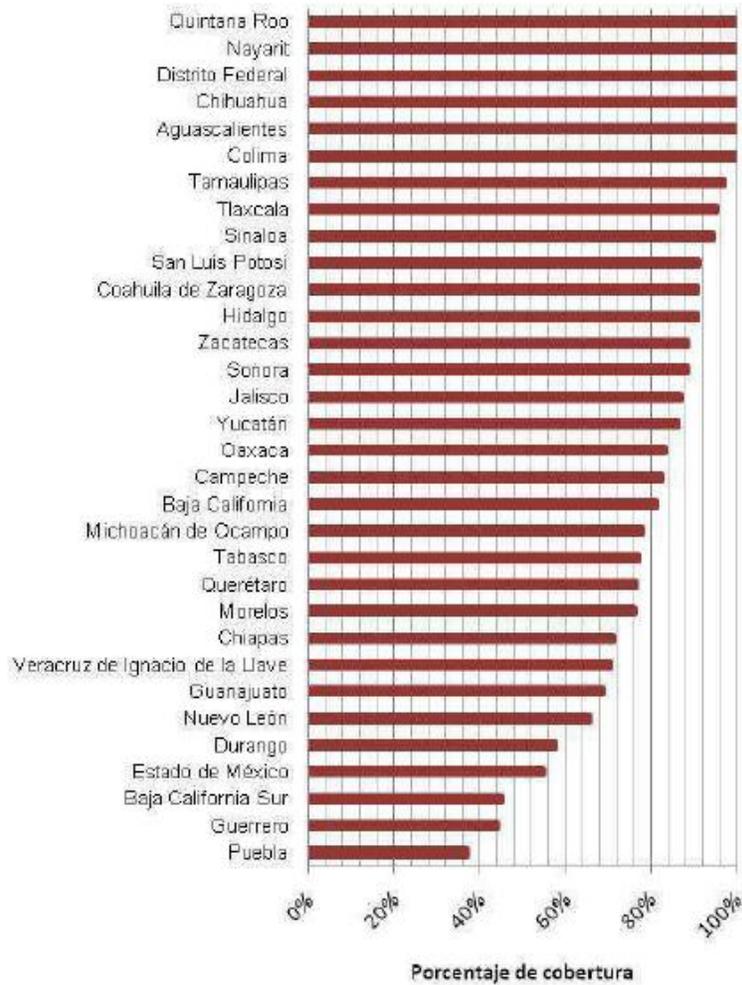


Figura 20. Cobertura de recolección por entidad federativa.

Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.

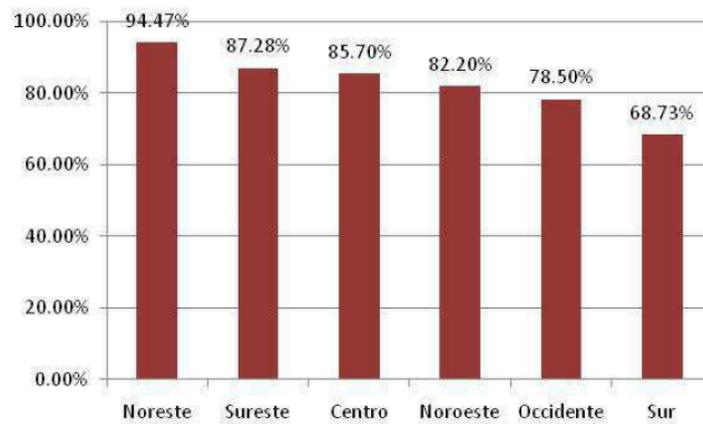
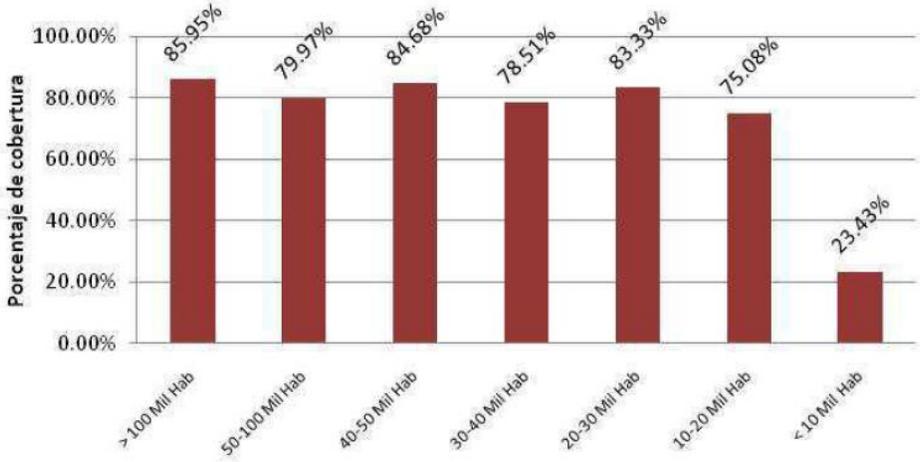


Figura 21. Cobertura de recolección por región.

Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.

Analizando la cobertura por tamaño de municipio se observa que la mayor recolección es en los municipios con población mayor a los 100 mil habitantes y la menor con los municipios menores a 10 mil habitantes. Este comportamiento lo podemos ver en la figura 22 al igual que los porcentajes de cobertura por tamaño de municipio.



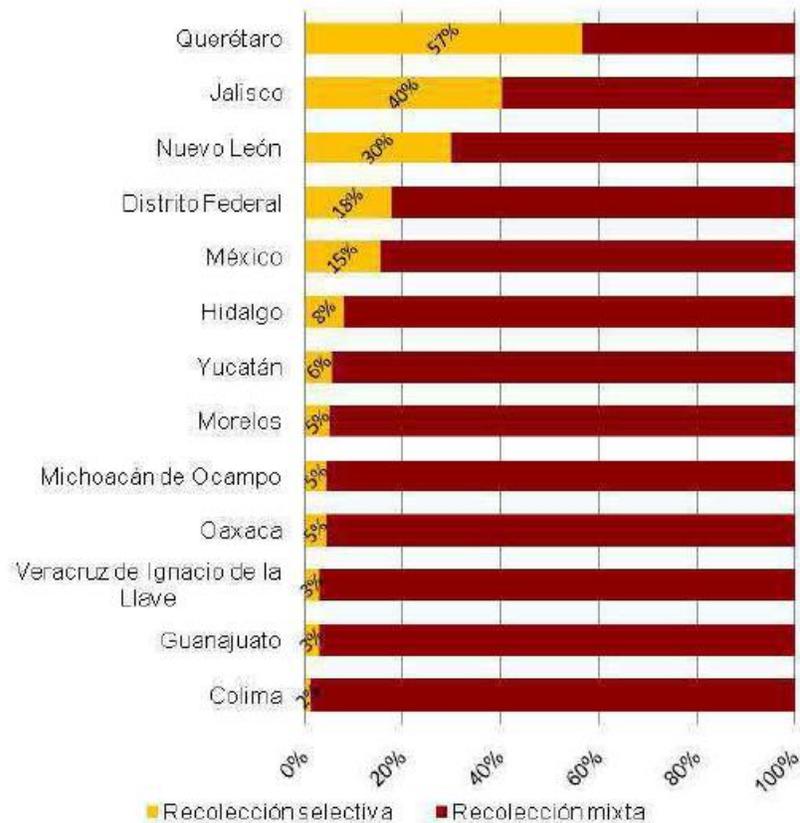
**Figura 22. Cobertura de recolección por tamaño de municipio.**

**Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.**

De las 32 entidades federativas solo 13 realizan recolección selectiva de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Los estados con mayor porcentaje de recolección selectiva son Querétaro con 57%, Jalisco con 40% y Nuevo León con 30%. En la figura 23 podemos observar los porcentajes de recolección por entidad federativa. La recolección separada es mayor en las regiones Occidente y Centro, como dato adicional la recolección en la región Noroeste aún sigue siendo totalmente mixta. La mayor recolección por tipo de municipio es para los que tienen una cantidad mayor a 100 mil habitantes con 12.11% y la menor es para los municipios con población entre 40 y 50 mil habitantes con 1.72%. En cuanto al transporte, los costos de recolección están en el intervalo de \$130.09 y \$2664.24 pesos por tonelada

**Plantas de selección de residuos.**

No existe información al respecto con las plantas de selección de residuos solo en el Distrito Federal ya que se hizo una concesión a una empresa privada, y con ayuda de la UNAM, IPN y la UAM se realizó un reporte del número de plantas de selección de residuos existentes en el país. En la figura 24 podemos ver este reporte, destacando las plantas de Guadalajara Jalisco, en Monterrey y el Distrito Federal.



**Figura 23. Recolección de RSU por entidad federativa.**

**Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.**

### **Transferencia.**

A nivel nacional se reportan 86 estaciones de transferencia, la mayoría de estas instalaciones 71.43% solo realizan actividades de transferencia, en un 22.62% se realizan actividades de transferencia separada y en el 5.95% se realizan actividades de acondicionamiento de los materiales separados como compactación, fleje y trituración. En la figura 25 podemos ver la distribución de estaciones de transferencia por región del país.

### **Disposición final.**

La disposición final de los residuos se refiere a su depósito o confinamiento permanente en sitios e instalaciones cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las posibles afectaciones a la salud de la población y de los ecosistemas. Los sitios de disposición final tanto los rellenos sanitarios como los sitios controlados deben:

- 1) Garantizar la extracción, captación, conducción y control de los biogases generados.

- 2) Garantizar la captación y extracción de los lixiviados.
- 3) Contar con drenajes pluviales para el desvío de escurrimientos y el desalojo del agua de lluvia.
- 4) Controlar la dispersión de materiales ligeros, así como la fauna nociva y la infiltración pluvial.

Los rellenos sanitarios constituyen la mejor solución para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Este tipo de infraestructura involucra métodos y obras de ingeniería particulares que controlan, a través del tratamiento de los lixiviados (es decir, de los líquidos que escurren directamente de los residuos o por efecto de la lluvia), así como de la quema de gases, la reforestación en el área del relleno y el control de olores, los posibles impactos de los residuos al ambiente y la salud humana.

De la cantidad de RSU que es enviada a disposición final, el 60.54% es dispuesta en rellenos sanitarios y sitios controlados, el 15.93% en tiraderos a cielo abierto y el 2.07% restante se desconoce dónde se deposita. Dentro de esta actividad resaltan tres entidades federativas: Baja California, Aguascalientes y Distrito Federal quienes reportan que el 100% de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es dispuesto en un relleno sanitario y sitio controlado, por el contrario, los estados de Oaxaca, Michoacán y Tabasco reportan más del 55% de sus RSU dispuestos en tiraderos a cielo abierto.

Los municipios con un intervalo de población de 20 mil a 30 mil habitantes son los que mayor porcentaje de RSU disponen en tiraderos a cielo abierto, los municipios con población mayor a 100 mil habitantes son quienes mejor disponen los RSU pues en promedio el 90% es dispuesto en un relleno sanitario, y finalmente los municipios con población menor a 10 mil habitantes no tienen el conocimiento de cómo disponer los RSU que generan.

En cuanto al análisis por región, las regiones Centro, Noroeste y Noreste son las que mejor disponen sus residuos con porcentajes de disposición en rellenos sanitarios y sitios controlados superiores al 80%, por el contrario la región con disposición inadecuada corresponde a la Sur con 47.66% de RSU depositados en tiraderos a cielo abierto. En la figura 26 podemos ver el tipo de disposición final de los RSU por entidad federativa.

Ubicación	Ingreso a la planta (ton/día)	Salida a la planta reciclables (ton/día)	Eficiencia recuperación de productos
Guadalajara, Jalisco	90.00	5.00	5.56%
Apodaca, Nuevo León	3000.00	65.00	2.17%
General Escobedo, Nuevo León			
Guadalupe, Nuevo León			
Monterrey, Nuevo León			
San Nicolás de los Garza, Nuevo León			
San Pedro Garza García, Nuevo León			
Santa Catarina, Nuevo León			
Naucalpan, Edo. México	40.00	1.19	2.98%
Nicolás Romero, Edo. México	300.00	73.80	24.60%
Santa Catarina, Distrito Federal	4500.00	450.00	10.00%
Bordo Poniente, Distrito Federal			10.00%
San Juan de Aragón, Edo. México (Distrito Federal)			10.00%
Aguascalientes, Ags.	17.85	ND	ND
Benito Juárez, Q. Roo	800.00	ND	ND
Ciudad Juárez, Chihuahua	1263.89	ND	ND
San Luis Potosí, SLP	800.00	ND	ND
Tuxtla Gutierrez, Chiapas	80.00	ND	ND
Villahermosa, Tabasco	558.13	ND	ND
Emiliano Zapata, Morelos	21.00	ND	ND
Morelia, Michoacán	775.00	ND	ND
Querétaro, Querétaro	29.27	3.24	11.07%
Puebla, Puebla	60.00	1.80	3.00%

Figura 24. Plantas de selección de residuos existentes en el país.

Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.

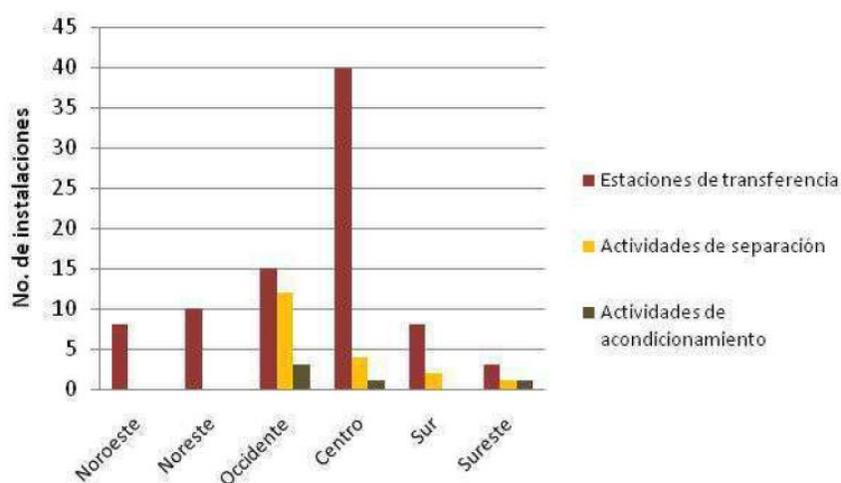
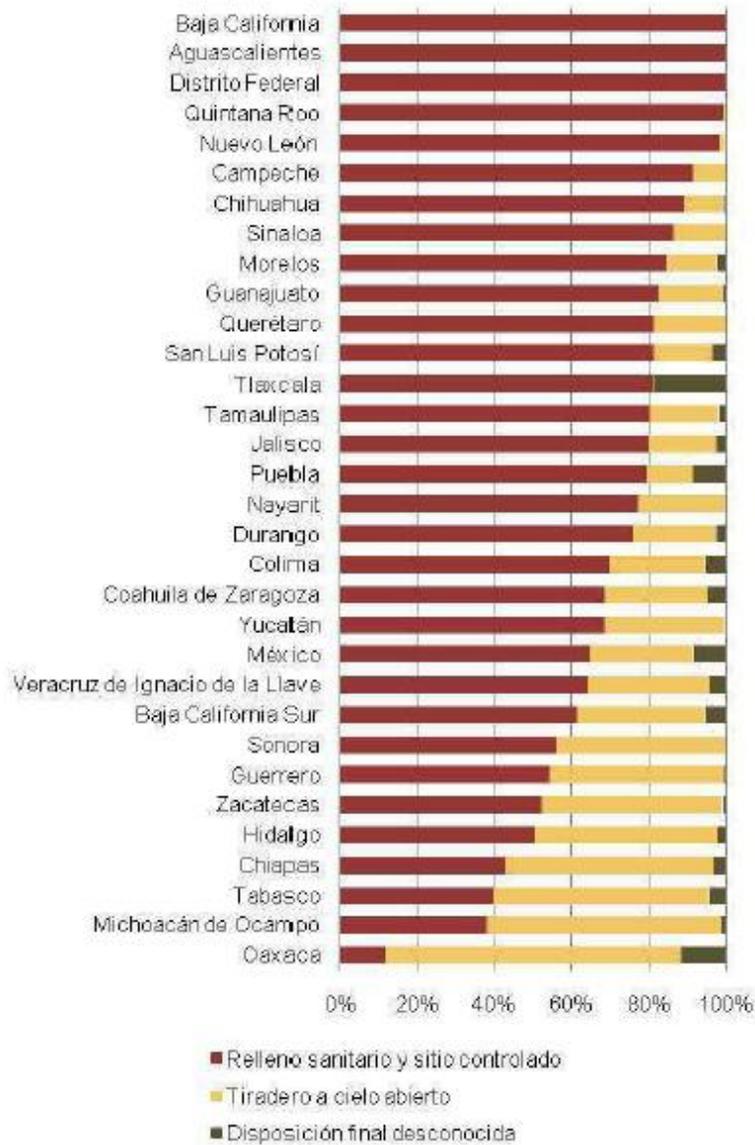


Figura 25. Distribución de estaciones de transferencia por región.

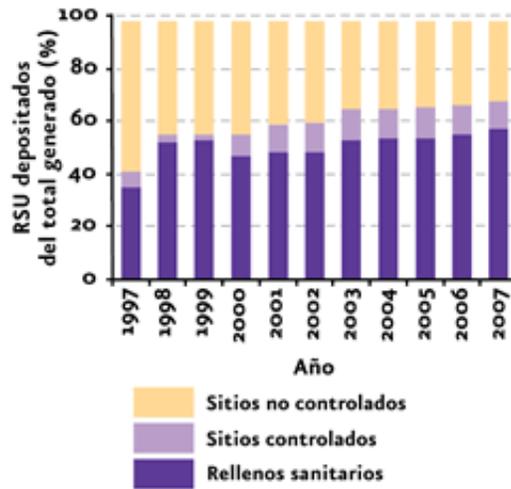
Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.



**Figura 26. Tipo de disposición final de RSU por entidad federativa.**

**Fuente: Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012.**

Mientras ha transcurrido el tiempo se ha mejorado la disposición final de los RSU. En 2007, se estimó que 67% del volumen generado de RSU en el país se dispuso en rellenos sanitarios y sitios controlados, y el restante se depositó en sitios no controlados. Esto resulta un incremento importante si se considera que en 1997 cerca de 60% se depositaba en sitios no controlados (Figura 27). Si se analiza a nivel de entidad federativa, en 2007 el Distrito Federal, Aguascalientes y Nuevo León dispusieron casi la totalidad de sus residuos en rellenos sanitarios y sitios controlados. Sin embargo, Oaxaca, Hidalgo y Chiapas dispusieron un volumen bajo de RSU en este tipo de instalaciones, con valores menores a 30% del total de residuos producidos (Figura 28).



**Nota:**  
 1El porcentaje total de disposición no llega a 100 debido a que una porción de los residuos es reciclada.

Figura 27. Disposición final de los RSU en el periodo de tiempo de 1997 a 2007.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

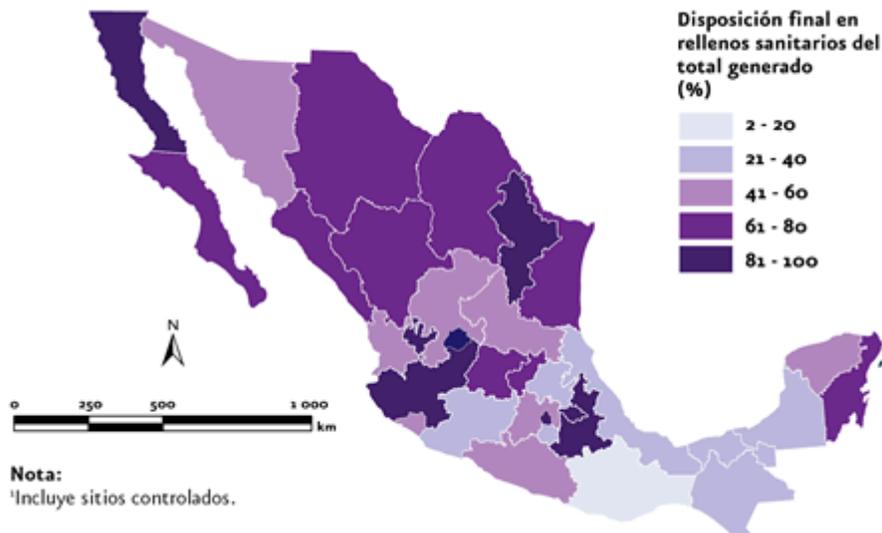


Figura 28. Disposición final de los RSU en rellenos sanitarios por entidad federativa en el año 2007.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

En cuanto al número de rellenos sanitarios en México, se ha logrado un avance significativo en el establecimiento de este tipo de infraestructura en los últimos años. Entre 1995 y 2007 la cifra creció de 30 a 114 sitios, contándose además, para este último año, con 24 sitios controlados. Sólo Oaxaca y

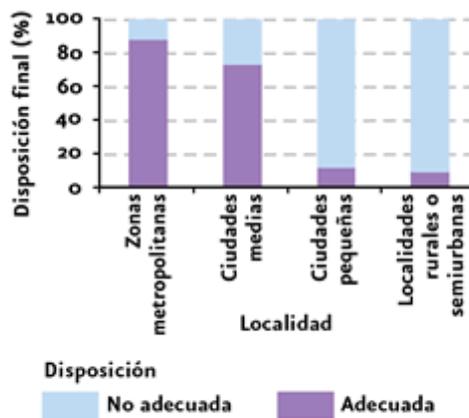
Zacatecas no tenían, hasta esa fecha, rellenos sanitarios, pero contaban, respectivamente, con uno y tres sitios controlados (Figura 29).



Figura 29. Rellenos sanitarios por entidad federativa en el año 2007.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

En general, en América Latina los avances en materia de rellenos sanitarios se han orientado principalmente a las grandes ciudades (BID-OPS, 1997) y México no es la excepción. Cuando se analiza la disposición adecuada de los residuos por tipo de localidad, en las zonas metropolitanas el 88% de los residuos se dispone adecuadamente, es decir, en rellenos sanitarios y sitios controlados, mientras que en las localidades rurales o semiurbanas esta cifra es de tan sólo del 9.6% (Figura 30).



Nota:  
<sup>1</sup>Incluye sitios controlados.

Figura 30. Disposición final de RSU en rellenos sanitarios y sitios no controlados por tipo de localidad en el año 2007. Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

## Reciclaje.

El volumen de RSU que se recicla en el país, aunque se ha incrementado, aún resulta bajo. De acuerdo con las cifras obtenidas de los sitios de disposición final de residuos, en 2007 se recicló 3.3% del volumen de los RSU generados (Figura 31). Sin embargo, esta cifra podría ser mayor, e incluso alcanzar el 10%, dado que muchos de los RSU que se puede reciclar se recuperan directamente en los contenedores y en los vehículos de recolección. Del volumen total de RSU reciclados en 2007, el mayor porcentaje correspondió al papel, cartón y sus derivados (38.7%), seguidos por el vidrio (34.7%) y los metales (26%; Figura 32). Por otro lado, si se considera el volumen reciclado de cada tipo de RSU con respecto a su volumen producido, los sólidos que más se reciclaron en 2007 fueron los metales (24.1% del total de metales generados), el vidrio (17.8%), papel (8.5%) y los plásticos y textiles, con 0.3% cada uno.

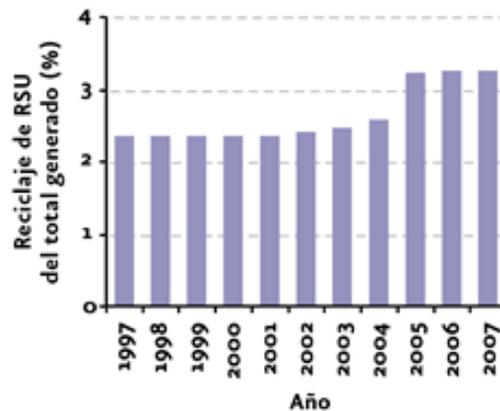


Figura 31. Reciclaje de los RSU en el periodo de tiempo 1997 a 2007.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

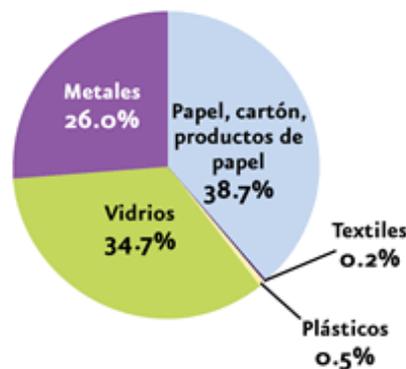


Figura 32. Reciclaje de RSU por composición en el año 2007.

Fuente: Residuos SEMARNAT 2007.

## **Los Residuos Sólidos en la Ciudad de México o Distrito Federal.**

En cuanto al Distrito Federal ahora llamado Ciudad de México (CDMX) tenemos que ya se cuenta con una ley propia para la gestión de Residuos Sólidos que es la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal donde se debe elaborar un inventario de las fuentes generadoras de Residuos y la clasificación de los mismos. Este inventario se realiza cada año y es un reporte que realiza el gobierno de la Ciudad de México para conocer todo lo que concierne a los Residuos Sólidos de la Ciudad.

Como la Ciudad de México (CDMX) es el centro económico y político del país, en esta se llevan a cabo actividades diversas que inciden en la generación promedio de 12893 Toneladas diarias de Residuos Sólidos producidos por 8 851 080 habitantes (2)

El total de los residuos son generados tanto por la población que tiene su residencia en la Ciudad como por la población flotante que transita diariamente en la entidad. Los habitantes de la Ciudad representan el 7.9% de la población total del país. En promedio por habitante de la ciudad hay una generación de 1.46 kilogramos de Residuos Sólidos (2).

En cuanto geográficamente hablando en tres delegaciones de la Ciudad de México es donde se concentra el 41.17% de la generación total de los Residuos siendo Iztapalapa con 2274, Gustavo A. Madero con 1709 y Cuauhtémoc con 1325 toneladas generadas diariamente.

En la figura 33 podemos ver la cantidad de generada de residuos en toneladas por día y la generación per cápita en kilogramo por habitante por día de cada una de las delegaciones del Distrito Federal.

En la Ciudad de México en promedio se generan 1.46 kilogramos de residuos por habitante aunque de manera particular la delegación Cuauhtémoc es la que tiene mayor generación de Residuos por habitante con 2.49 kilogramos seguida de la delegación Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza con 2.16 y 1.98 kilogramos de residuos generados diariamente respectivamente.

Tanto en la generación como en la generación per cápita inciden los factores de crecimiento y desarrollo de servicios, comercios e industria, nivel de urbanización, aumento de los niveles de consumo, incremento de la población flotante que realizan diferentes actividades en la Ciudad.

### **Residuos Sólidos por fuente.**

Del total de los residuos generados en la Ciudad de México se estima que 48% corresponde a residuos domiciliarios seguido del 15% que generan comercios y servicios de manera independiente, 22% de los residuos son generados por mercados, central de abastos, diversos y controlados que provienen de hospitales, reclusorios y de manejo especial; toda esta información la podemos ver en la figura 34.

Delegación	Generación total (ton/día)	Generación per-cápita (kg/hab/día)
Alvaro Obregón	650	0.89
Azcapotzalco	519	1.25
Benito Juárez	686	1.78
Coyoacán	812	1.31
Cuajimalpa	180	0.97
Cuauhtémoc	1,325	2.49
Gustavo A. Madero	1,709	1.44
Iztacalco	472	1.23
Iztapalapa	2,274	1.25
Magdalena Contreras	254	1.06
Miguel Hidalgo	806	2.16
Milpa Alta	117	0.89
Tláhuac	366	1.02
Tlalpan	839	1.29
Venustiano Carranza	855	1.98
Xochimilco	444	1.07
Central de Abasto	585	N/D

**Figura 33. Generación de Residuos por Delegación en la Ciudad de México.**

**Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.**



**Figura 34. Residuos Sólidos por fuente en la Ciudad de México.**

**Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.**

### *Recolección Selectiva.*

En 2004 se implementó el programa de recolección selectiva que contribuye a una cultura de reciclaje ya que los residuos se separan en Orgánicos e Inorgánicos para una mejor gestión.

### *Barrido Manual y Barrido Mecánico.*

Para el Barrido Manual se tienen 6754 rutas y para el barrido mecánico se tienen 84 barredoras mecánicas que se encuentran en condiciones diversas.

### *Puntos específicos de recolección.*

En la Ciudad de México hay lugares y espacios públicos en los cuales se lleva a cabo la recolección selectiva de los Residuos Sólidos que son puntos específicos de recolección que sirven para disminuir las afectaciones que se derivan de una mala recolección de Residuos. En la Ciudad se cuentan con 6947 puntos específicos de recolección. En la figura 35 podemos ver la cantidad de puntos específicos de recolección de Residuos Sólidos por tipo desglosado por Delegaciones.

## **Infraestructura para el manejo de Residuos Sólidos en la Ciudad de México.**

Estaciones de transferencia.

### *Origen de los Residuos.*

En las estaciones de transferencia se realiza el traslado de los Residuos de vehículos recolectores a vehículos de carga de gran tonelaje ya sea para aprovecharlos o para su disposición final. Las estaciones con las que cuenta la Ciudad de México se ubican en las delegaciones: Álvaro Obregón,

Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Milpa Alta, Tlalpan, Venustiano Carranza, Xochimilco y en la Central de Abasto. El total de Residuos que ingresan a las estaciones de transferencia es de 8080 toneladas provenientes de su respectiva delegación con un aporte de 87%, también ingresa un 13% que proviene de la Central de Abasto, la Secretaría de Obras y Servicios y del servicio particular de limpia. En la figura 36A y la figura 36B podemos ver el origen de los residuos en las estaciones de transferencia de la Ciudad de México desglosando en toneladas por mes. Como se observa en la figura 36 la mayor cantidad de residuos proviene de la recolección delegacional y esta varía conforme el tiempo coincidiendo con las estaciones de mayor temperatura.

#### *Destino de los Residuos.*

De las 8080 toneladas que egresan diariamente de las estaciones de transferencia 42% de los residuos son enviados a plantas de composta, a plantas de selección y compactadoras debido a sus características de potencial valorización y 58% de los residuos se envía a disposición final ya que no tienen aún potencial económico en el mercado de reciclaje. En la figura 37A y la figura 37B podemos ver el destino de los Residuos Sólidos en las Estaciones de Transferencia en la Ciudad de México presentados con flujos de toneladas por mes.

Delegación	Unidades habitacionales	Edificios públicos	Escuelas	Mercados	Centros comerciales	Terminales	Parques y plazas	Servicios e industria	Otros	Total
Álvaro Obregón	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	0
Azcapotzalco	25	20	228	19	0	0	0	42	0	334
Benito Juárez	3	88	118	16	0	0	29	0	32	286
Coyoacán	54	80	226	109	0	0	1	10	0	480
Cuajimalpa	4	49	52	12	1	0	7	0	4	129
Cuauhtémoc	0	68	289	105	0	0	125	54	28	669
Gustavo A. Madero	34	31	576	75	15	0	333	0	11	1,075
Iztacalco	0	110	150	26	0	0	0	12	1	299
Iztapalapa	241	150	528	87	40	8	189	34	0	1,277
Magdalena Contreras	4	4	79	5	2	5	37	N/D	0	136
Miguel Hidalgo	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	0
Milpa Alta	0	136	83	19	0	15	12	0	11	276
Tláhuac	116	33	105	19	0	0	0	0	69	342
Tlalpan	33	93	58	100	47	2	100	161	97	691
Venustiano Carranza	71	32	217	42	0	0	88	0	0	450
Xochimilco	35	125	120	48	10	3	146	0	16	503
<b>Total</b>	<b>620</b>	<b>1,019</b>	<b>2,829</b>	<b>682</b>	<b>115</b>	<b>33</b>	<b>1,067</b>	<b>313</b>	<b>269</b>	<b>6,947</b>

Figura 35. Puntos específicos de recolección de Residuos Sólidos en la Ciudad de México.

Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.

Concepto	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Dirección General de Servicios Urbanos	12,967	11,614	11,915	11,597	12,199	12,296	11,867
Central de Abasto	16,897	17,689	18,124	17,563	17,986	17,626	16,897
Pago por derechos	2,434	569	1,587	1,145	1,462	1,127	1,604
Recolección delegacional	217,039	179,548	214,925	196,558	219,155	198,818	247,819
<b>Total</b>	<b>249,337</b>	<b>209,420</b>	<b>246,551</b>	<b>226,863</b>	<b>250,802</b>	<b>229,867</b>	<b>278,187</b>

Figura 36 A. Origen de los Residuos Sólidos para su procesamiento en la Ciudad de México.

Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.

Concepto	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total (ton/año)	Total (ton/ día)
Dirección General de Servicios Urbanos	11,849	12,896	11,923	12,364	12,983	146,470	401
Central de Abasto	17,917	18,758	17,679	17,812	18,578	213,526	585
Pago por derechos	1,842	1,644	1,238	813	860	16,325	45
Recolección delegacional	238,556	216,989	220,642	207,717	215,182	2'572,948	7,049
<b>Total</b>	<b>270,164</b>	<b>250,287</b>	<b>251,482</b>	<b>238,706</b>	<b>247,603</b>	<b>2'949,269</b>	<b>8,080</b>

Figura 36 B. Origen de los Residuos Sólidos para su procesamiento en la Ciudad de México.

Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.

Origen	Destino	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Estaciones de transferencia	San Juan de Aragón Fase I	1,539	7,077	10,606	13,987	11,609	12,234	12,606
	San Juan de Aragón Fase II	7,701	8,586	11,814	8,341	9,394	12,142	10,928
	San Juan de Aragón	16,723	18,362	16,540	17,198	21,373	18,404	25,860
	Santa Catarina	13,700	14,427	16,538	13,871	11,883	12,833	15,690
	<b>Subtotal</b>	<b>39,663</b>	<b>48,453</b>	<b>55,498</b>	<b>53,397</b>	<b>54,259</b>	<b>55,613</b>	<b>65,084</b>
Recolectores G.A.M	San Juan Fase I	0	0	0	0	0	0	0
	San Juan Fase II	17,604	11,496	11,260	14,348	10,620	10,080	11,109
	San Juan de Aragón	5,912	15,087	17,728	15,612	18,812	16,687	20,110
	<b>Subtotal</b>	<b>23,516</b>	<b>26,583</b>	<b>28,988</b>	<b>29,960</b>	<b>29,432</b>	<b>26,767</b>	<b>31,219</b>
Recolectores DGSU	San Juan de Aragón Fase II	448	476	40	152	140	184	212
	San Juan de Aragón	48	52	80	56	32	36	36
	<b>Subtotal</b>	<b>496</b>	<b>528</b>	<b>120</b>	<b>208</b>	<b>172</b>	<b>220</b>	<b>248</b>
Recolección Edo. de México	San Juan de Aragón Fase II	1,230	955	2,791	690	3,404	1,879	0
	San Juan de Aragón	14,820	719	247	28	650	1,380	705
	Santa Catarina	24,309	19,164	22,350	25,228	23,862	24,349	32,547
	<b>Subtotal</b>	<b>40,359</b>	<b>20,838</b>	<b>25,388</b>	<b>25,946</b>	<b>27,916</b>	<b>27,608</b>	<b>33,252</b>
<b>Total</b>		<b>104,034</b>	<b>96,402</b>	<b>109,994</b>	<b>109,514</b>	<b>111,778</b>	<b>110,209</b>	<b>129,803</b>

Figura 37 A. Destino de los Residuos Sólidos en las estaciones de transferencia de la Ciudad de México.

Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.

Origen	Destino	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total	Ton/día
Estaciones de transferencia	San Juan de Aragón Fase I	15,032	2,699	0	315	0	87,704	240
	San Juan de Aragón Fase II	12,379	11,276	13,743	8,873	5,188	120,365	330
	San Juan de Aragón	23,434	22,232	23,115	19,207	11,854	234,302	642
	Santa Catarina	13,868	13,630	16,564	13,494	9,169	165,667	454
	<b>Subtotal</b>	<b>64,713</b>	<b>49,837</b>	<b>53,422</b>	<b>41,889</b>	<b>26,211</b>	<b>608,038</b>	<b>1,666</b>
Recolectores G.A.M.	San Juan de Aragón Fase I	0	11,107	13,562	14,714	10,754	50,137	137
	San Juan de Aragón Fase II	4,534	6,333	9,170	5,784	10,494	122,832	337
	San Juan de Aragón	19,066	15,858	15,370	16,180	19,544	195,966	537
	<b>Subtotal</b>	<b>23,600</b>	<b>33,298</b>	<b>38,102</b>	<b>36,678</b>	<b>40,792</b>	<b>368,935</b>	<b>1,011</b>
Recolectores DGSU	San Juan de Aragón Fase II	116	120	332	512	404	3,136	8
	San Juan de Aragón	8	76	108	84	92	708	2
	<b>Subtotal</b>	<b>124</b>	<b>196</b>	<b>440</b>	<b>596</b>	<b>496</b>	<b>3,844</b>	<b>10</b>
Recolección Edo. De México	San Juan de Aragón Fase II	0	0	0	0	0	10,949	30
	San Juan de Aragón	634	621	669	603	1,194	22,270	61
	Santa Catarina	30,025	39,008	39,762	36,591	40,365	357,560	980
	<b>Subtotal</b>	<b>30,659</b>	<b>39,629</b>	<b>40,431</b>	<b>37,194</b>	<b>41,559</b>	<b>390,779</b>	<b>1,071</b>
<b>Total</b>		<b>119,096</b>	<b>122,960</b>	<b>132,395</b>	<b>116,357</b>	<b>109,058</b>	<b>1'371,600</b>	<b>3,758</b>

Figura 37 B. Destino de los Residuos Sólidos en las estaciones de transferencia de la Ciudad de México.

Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.

## Plantas de Selección.

Las plantas de selección son sitios donde se lleva a cabo la selección y separación de materiales que conservan sus características físicas y químicas. En las plantas de selección se recibe un total de 3758 toneladas de residuos sólidos al día de los cuales 44% proviene de las estaciones de transferencia y 56% proviene de la recolección realizada por el servicio de limpia delegacional, de la Secretaría de Obras y Servicios, así como del Estado de México.

La Ciudad de México cuenta actualmente con dos plantas de selección de Residuos Urbanos y están ubicadas en San Juan de Aragón y en Santa Catarina de las cuales se reciclan materiales como PVC, PET, vidrio, aluminio, fierro, etc. y de las dos plantas se recuperan 191 toneladas de subproducto al día. En la figura 38A y la figura 38B podemos ver el origen, destino y cantidad de residuos sólidos en las plantas de selección en la Ciudad de México resultados presentados en toneladas por mes. Se puede ver que de todo lo recibido no se recuperan muchos materiales y la mayoría pasa a ser rechazado, así mismo se observa que se recuperan mayor cantidad de materiales en la segunda parte del año aunque se reciba una cantidad no tan diferente por ciclo.

Planta de Selección	Concepto	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
San Juan de Aragón Fase I	Recepción de residuos	1,017	3,883	5,312	7,498	8,200	7,134	9,111
	Recuperación de subproductos	0	0	0	0	0	0	0
	Rechazo	1,017	3,883	5,312	7,498	8,200	7,134	9,111
San Juan de Aragón Fase II	Recepción de residuos	29,389	23,133	27,832	25,210	24,873	24,301	22,249
	Recuperación de subproductos	817	643	774	701	691	676	1,809
	Rechazo	28,572	22,490	27,058	24,509	24,182	23,625	20,440
San Juan de Aragón	Recepción de residuos	35,619	35,796	37,964	37,705	42,959	41,592	46,711
	Recuperación de subproductos	851	856	907	901	1,027	994	2,165
	Rechazo	34,768	34,940	37,057	36,804	41,932	40,598	44,546
Santa Catarina	Recepción de residuos	38,009	33,590	38,886	39,101	35,746	37,182	48,237
	Recuperación de subproductos	935	826	957	962	879	915	5,021
	Rechazo	37,074	32,764	37,929	38,139	34,867	36,267	43,216
Total	Recepción de residuos	104,034	96,402	109,994	109,514	111,778	110,209	126,308
	Recuperación de subproductos	2,603	2,325	2,638	2,564	2,597	2,585	8,995
	Rechazo	101,431	94,077	107,356	106,950	109,181	107,624	117,313
	Compactadoras	0	0	0	0	0	0	3,495

**Figura 38 A. Plantas de selección de Residuos Sólidos en la Ciudad de México, Origen, destino y cantidad de residuos sólidos ingresados.**

**Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.**

Planta de Selección	Concepto	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total	Ton/día
San Juan de Aragón Fase I	Recepción de residuos	8,456	6,783	5,452	6,909	4,770	74,525	204
	Recuperación de subproductos	0	0	0	0	0	0	0
	Rechazo	8,456	6,783.00	5,452	6,909	4,770	74,525	204
San Juan de Aragón Fase II	Recepción de residuos	17,029	17,729.00	23,245	15,169	16,086	266,245	729
	Recuperación de subproductos	1,810	1,856	2,091	2,172	2,248	16,288	45
	Rechazo	15,219	15,873.00	21,154	12,997	13,838	249,957	685
San Juan de Aragón	Recepción de residuos	43,142	38,787.00	39,262	36,072	32,684	468,293	1,283
	Recuperación de subproductos	1,823	1,928	1,928	2,768	3,154	19,302	53
	Rechazo	41,319	36,859.00	37,334	33,304	29,530	448,991	1,230
Santa Catarina	Recepción de residuos	43,893	45,615.00	48,216	41,965	43,550	493,990	1,353
	Recuperación de subproductos	4,734	4,711	4,992	4,472	4,792	34,196	93
	Rechazo	39,159	40,904.00	43,224	37,493	38,758	459,794	1,259
Total	Recepción de residuos	112,520	108,914	116,175	100,115	97,090	1'303,053	3,569
	Recuperación de subproductos	8,367	8,495	9,011	9,412	10,194	69,786	191
	Rechazo	104,153	100,419	107,164	90,703	86,896	1'233,267	3,378
	Compactadoras	6,579	14,046	16,220	16,241	11,969	68,488	187

**Figura 39. Plantas de selección de Residuos Sólidos en la Ciudad de México, Origen, destino y cantidad de residuos sólidos ingresados.**

Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.

### Plantas de Composta.

La Ciudad de México cuenta con 8 plantas de compostaje ubicadas en Bordo Poniente IV etapa, Bosque de San Juan de Aragón, Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Iztapalapa, Milpa Alta (2) y Xochimilco que de manera conjunta reciben 316,711 toneladas al año provenientes de estaciones de transferencia, mercados, áreas verdes, podas y pastos (figura 39). Con la cantidad recibida se produce actualmente 121,657 toneladas de composta (figura 40). En la figura 39 podemos ver que la planta de composta que recibe más residuos es la planta del Bordo Poniente seguida por la de Cuajimalpa con 307,571 y 1830 toneladas por año respectivamente, las que reciben menor cantidad son las plantas de las de San Juan de Aragón y la de Álvaro Obregón con 422 y 1771 toneladas por años respectivamente.

En la figura 40 podemos observar que así como reciben residuos producen composta las plantas de compostaje, teniendo en primer lugar la planta del Bordo Poniente con 118416 toneladas por año de composta y esta composta se le da diferente destino como lo es para parques, jardines, áreas verdes, agricultura etc.

Nombre de la planta de composta	Origen de los residuos	Cantidad (ton/año)
Bordo Poniente	Estaciones de transferencia	307,571
Álvaro Obregón	Poda, pasto, hojarasca, estiércol.	1,771
Cuajimalpa	Poda, parques y flores.	1,830
Iztapalapa	Mercados y residuos del mantenimiento de las áreas verdes; poda, flores, otros.	1,789
Milpa Alta	Poda, flores, residuos de nopal.	1,600
Xochimilco	Poda, flores, residuos de nopal, residuos orgánicos, estiércol.	1,728
San Juan de Aragón	Poda, flores, residuos de nopal, residuos orgánicos, estiércol.	422

**Figura 40. Origen de los residuos sólidos en la Ciudad de México para plantas de composta.**

**Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.**

Nombre de la planta de composta	Composta producida ton/año	Destino de la Composta
Bordo Poniente	118,416	Humus entregado a la Dirección de Limpia e Imagen Urbana (DLIU),
Álvaro Obregón	1,412	Parques, jardines y áreas verdes. Invernaderos y viveros
Cuajimalpa	915	Parques, jardines y áreas verdes
Iztapalapa	186	Parques, jardines, áreas verdes. Agricultura
Milpa Alta	314	Agricultura
Xochimilco	372	Poda, flores y residuos de nopal
San Juan de Aragón	42	N/D

**Figura 41. Cantidad y destino de la composta producida en las plantas de composta de la Ciudad de México.**

**Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.**

### Sitios de Disposición Final.

En la actualidad la Ciudad de México no cuenta con un relleno sanitario para disponer sus residuos por lo que tiene acuerdos con los gobiernos del Estado de México y Morelos para su disposición. Diariamente se reciben 8090 toneladas en estos sitios donde Cañada y el Milagro son los que reciben el 77% del total de residuos a disposición final (figura 41). En la figura 41A y la figura 41B podemos observar el origen y la cantidad de Residuos Sólidos en los sitios de disposición final en la Ciudad de México con flujos de toneladas por mes. En la figura 41A y la figura 41B se observa que la cantidad

total de residuos varia con el tiempo en poca cantidad, también podemos observar que la mayor cantidad de residuos proviene de las estaciones de transferencia, así mismo como los mayores flujos se tienen en los meses de Julio y Octubre.

Origen	Destino	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	
Plantas de Selección de Residuos	Sitios de disposición final	Cañada	20,350	30,698	35,151	37,223	37,503	33,497	36,554
		Cuautitlán	25,790	21,884	21,736	24,777	26,713	19,465	19,090
		Cuautla	5,697	5,466	5,994	5,976	2,473	7,753	6,133
		Milagro	42,751	36,029	44,475	38,974	42,492	46,909	55,536
		Tepotztlán	6,843	0	0	0	0	0	0
	<b>Subtotal</b>	<b>101,431</b>	<b>94,077</b>	<b>107,356</b>	<b>106,950</b>	<b>109,181</b>	<b>107,624</b>	<b>117,313</b>	
Estaciones de transferencia	Sitios de disposición final	Cañada	87,833	60,640	70,427	68,238	62,688	70,590	59,920
		Cuautla	717	221	0	0	1,853	21	0
		Cuautitlán	24,106	22,459	25,528	24,555	32,129	22,205	35,750
		Milagro	26,121	34,717	31,569	31,223	39,710	47,238	56,234
		Tepotztlán	11,904	0	0	0	0	0	0
	<b>Subtotal</b>	<b>150,681</b>	<b>118,037</b>	<b>127,524</b>	<b>124,016</b>	<b>136,380</b>	<b>140,054</b>	<b>151,904</b>	
Total	Sitios de disposición final	Cañada	108,183	91,338	105,578	105,461	100,191	104,087	96,474
		Cuautitlán	49,896	44,343	47,264	49,332	58,842	41,670	54,840
		Cuautla	6,414	5,687	5,994	5,976	4,326	7,774	6,133
		Milagro	68,872	70,746	76,044	70,197	82,202	94,147	111,770
		Tepotztlán	18,747	0	0	0	0	0	0
	<b>Total</b>	<b>252,112</b>	<b>212,114</b>	<b>234,880</b>	<b>230,966</b>	<b>245,561</b>	<b>247,678</b>	<b>269,217</b>	

Figura 42 A. Origen y cantidad de Residuos Sólidos en los sitios de disposición final de los Residuos Sólidos para la Ciudad de México.

Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.

Origen	Destino	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total	Ton/día	
Plantas de Selección de Residuos	Sitios de Disposición Final	Cañada	35,233	34,380	31,529	21,001	18,126	371,245	1,017
		Cuautitlán	12,579	4,338	12,546	16,674	14,411	220,003	602
		Cuautla	6,012	5,965	6,343	5,664	5,320	68,796	188
		Milagro	50,329	55,736	56,746	47,364	49,039	566,380	1,552
		Tepetzotlán	0	0	0	0	0	6,843	19
	<b>Subtotal</b>		<b>104,153</b>	<b>100,419</b>	<b>107,164</b>	<b>90,703</b>	<b>86,896</b>	<b>1'233,267</b>	<b>3,378</b>
Estaciones de transferencia	Sitios de Disposición Final	Cañada	65,332	65,554	61,872	57,716	73,107	803,917	2,202
		Cuautla	0	0	0	0	0	2,812	8
		Cuautitlán	39,068	33,090	35,197	37,659	40,816	372,562	1,021
		Milagro	44,660	48,343	48,479	55,397	65,157	528,848	1,449
		Tepetzotlán	0	0	0	0	0	11,904	32
	<b>Subtotal</b>		<b>149,160</b>	<b>146,987</b>	<b>145,548</b>	<b>150,772</b>	<b>179,080</b>	<b>1'720,043</b>	<b>4,712</b>
Total	Sitios de Disposición Final	Cañada	100,565	99,934	93,401	78,717	91,233	1'175,162	3,219
		Cuautitlán	51,647	37,428	47,743	54,333	55,227	592,565	1,623
		Cuautla	6,012	5,965	6,343	5,664	5,320	71,608	196
		Milagro	94,989	104,079	105,225	102,761	114,196	1'095,228	3,001
		Tepetzotlán	0	0	0	0	0	18,747	51
	<b>Total</b>		<b>253,213</b>	<b>247,406</b>	<b>252,712</b>	<b>241,475</b>	<b>265,976</b>	<b>2'953,310</b>	<b>8,090</b>

Figura 43. Origen y cantidad de Residuos Sólidos en los sitios de disposición final de los Residuos Sólidos para la Ciudad de México.

Fuente: Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.

## CAPÍTULO 2. GASIFICACIÓN DE RSU.

En este capítulo se estudia el proceso de gasificación, las tecnologías existentes para poder realizar el proceso de gasificación a nivel industrial, el uso del hidrógeno en el mundo y el programa o software ASPEN plus Versión 8.4 para modelar procesos.

### Gasificación.

En el capítulo anterior se clasificó la biomasa a utilizar que son los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) con los cuales obtendremos hidrógeno por el método de gasificación.

Para la gasificación de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se tiene que hay varios caminos los cuales son presentados en el siguiente diagrama.

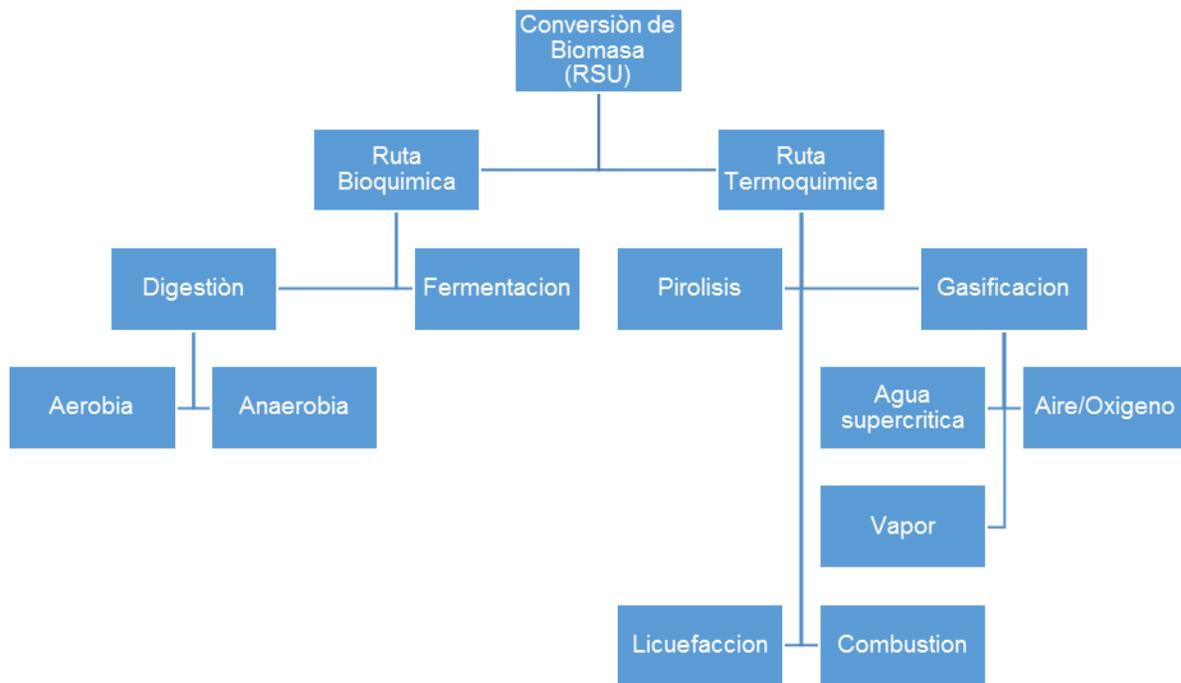


Diagrama 1. Métodos de conversión de biomasa a energía (3)

Fuente: Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design. Prabir Basú 2010.

En el diagrama 1 se presenta como método de conversión de biomasa y en nuestro caso estudiamos RSU, esto es porque la biomasa es un sólido y los RSU se analizan como un combustible sólido con características muy similares a la biomasa.

En la conversión termoquímica el total de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es convertido en gases los cuales son sintetizados en los químicos deseados o usados directamente en procesos como la combustión.

La gasificación convierte combustibles fósiles y no fósiles (sólidos, líquidos y gases) en gases para su aprovechamiento y otros productos químicos. La gasificación requiere de un medio de reacción el cual puede ser gas o agua supercrítica. Los gases de reacción para la gasificación pueden ser aire, oxígeno, vapor subcrítico o una combinación de varios de ellos.

Actualmente la gasificación de combustibles fósiles es más común que la de los no fósiles como la biomasa y la producción de gas de síntesis. Esto esencialmente es convertir el potencial del combustible de una forma a otra y las tres mayores motivaciones para la transformación son

- Incrementar el poder calorífico del combustible por medio de la exclusión de las partes no reactivas del combustible como el nitrógeno y el agua.
- Para remover el sulfuro y el nitrógeno
- Para reducir el carbón a hidrógeno (C/H) ratio masa en el combustible.

En general el alto contenido de hidrógeno, la temperatura de vaporización baja y la alta posibilidad del combustible en convertirse al estado gaseoso. La gasificación o la pirolisis son procesos con los cuales se incrementa el contenido relativo de hidrógeno en el producto a través de las siguientes maneras:

Directa: exposición directa del hidrógeno a una alta presión

Indirecta: exposición con vapor a alta temperatura y presión donde el hidrógeno que es un producto intermedio es agregado al producto. Este proceso igual se incluye el proceso de vapor reformado

Pirolisis: Reducción de carbón excluyéndolo mediante CHAR solido o CO<sub>2</sub>.

## **Tecnologías para la Gasificación. (4)**

De acuerdo a la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) los procesos y equipos de gasificación pueden ser clasificados de la siguiente manera:

Según la fuente de energía para el proceso de gasificación.

- Alotermico: Fuente de energía externa, es decir que no sea el propio combustible.
- Autotermico: La combustión parcial del combustible proporciona la energía para el proceso de gasificación.

Según la presión de operación en el gasificador.

- Baja presión: Gasificador que opera a presión atmosférica. Presión ligeramente positiva (más alta que la presión atmosférica) o negativa (un poco más baja que la presión atmosférica).
- Alta presión: Trabaja con presión más alta que la atmosférica. Son usados en grandes instalaciones generando cantidades considerables de gas de síntesis.

Según el movimiento relativo de los gases y el combustible.

- Flujo concurrente: El combustible sólido y los gases se mueven en la misma dirección y, en general, los gases se mueven hacia abajo (downdraft).
- Flujo contra corriente: El combustible y los gases se desplazan en direcciones contrarias y, en general, los gases se mueven hacia arriba (updraft).
- Flujo cruzado: Los gases generados se mueven transversalmente al flujo de combustible (crossflow).

Según el régimen de flujo en el gasificador.

- Lecho fijo: Considerado por diversos autores como referencia a la zona de reacción fija en los gasificadores convencionales, en los cuales, se lleva el combustible sólido a dicha zona.
- Lecho fluidizado: Cuando las partículas del combustible se mantienen en suspensión en un fluido
- Flujo por arrastre: Cuando se mezclan las partículas del combustible con el agente de gasificación y la mezcla es inyectada en una cámara que es donde ocurren las reacciones.

En cuanto a la forma de cargar combustible y descargar cenizas

- Intermitentes: Carga en grandes cantidades y descarga con los gasificadores inoperantes.
- Continuo o semicontinuo: La carga del combustible y la descarga de cenizas se hacen de manera continua o discreta y con el gasificador en operación, sin interferir en su desempeño.

En cuanto a la clase de comburente.

- Oxígeno
- Aire
- Oxígeno/vapor
- Aire/vapor.

### **Tecnologías de gasificación para la conversión termoquímica de RSU. (5)**

Hay varias tecnologías de gasificación que en las dos últimas décadas se han desarrollado y ahora están disponibles en el mercado para las plantas del tipo residuos con conversión a energía eléctrica (ploma et al, 2001; Malkow, 2004; Arena y Mastellone, 2005; Juniper, 2009). Umberto Arena propone una posible taxonomía (5) la cual es descrita en la Tabla 2 en la cual se destaca que las principales diferencias de los gasificadores que están relacionadas con la fuente de calor, de que si el gasificador opera a la presión atmosférica (por lo que la obtención de mayores rendimientos, contenidos de hidrógeno más grandes y poca limpieza de las unidades, pero que implica costos de inversión y de

operación más altos, que probablemente es prohibitivo para una unidad residuos a energía eléctrica), por el rango de temperatura de funcionamiento (que se puede determinar la posibilidad de obtener las cenizas de fondo bajo la forma de una herramienta fácil de manejar las escorias fundidas o los vítreos), por la forma en que los residuos se introducen en el gasificador (en la parte superior o en algún lado del gasificador) y se mueve alrededor dentro de el mismo (por la gravedad, flujos de aire o dispositivos mecánicos); y de la forma en que se utiliza aire u oxígeno o aire enriquecido con oxígeno como oxidante (el vapor de agua se utiliza principalmente para el carbón o gasificación de biomasa).

<b>Taxonomía de gasificadores de Residuos Sólidos</b>	
<b>Criterio</b>	<b>Tipo</b>
Fuente de calor.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasificador calentado directamente (auto-térmico).</li> <li>• Gasificador calentado indirectamente (alo- térmico).</li> </ul>
Presión.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasificador atmosférico.</li> <li>• Gasificador presurizado.</li> </ul>
Agente de gasificación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasificador de aire.</li> <li>• Gasificador de aire enriquecido de oxígeno.</li> <li>• Gasificador de Oxígeno.</li> <li>• Gasificador de vapor.</li> <li>• Gasificador de plasma</li> </ul>
Diseño de reactor.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasificador de cama fija (Updraft y Downdraft)</li> <li>• Gasificador de lecho fluidizado (Lecho burbujeante, lecho fluidizado circulante, lecho fluidizado circulante interno).</li> <li>• Gasificador de flujo de entrada.</li> <li>• Gasificador de horno giratorio.</li> <li>• Gasificador de movable</li> <li>• Gasificador de plasma.</li> </ul>
Temperatura.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasificador de baja temperatura.</li> <li>• Gasificador de alta temperatura.</li> </ul>
Estado de ceniza de fondo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasificador de ceniza de fondo seca.</li> <li>• Gasificador de escoria vitrificada.</li> </ul>
Recuperación de energía.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasificador de calor.</li> <li>• Gasificador de energía eléctrica.</li> </ul>

**Tabla 2 Taxonomía de los gasificadores de RSU.**

**Fuente: Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. Humberto Arena 2011.**

La mayoría de estas tecnologías se han desarrollado y comercializado para la cogeneración de calor y electricidad a partir de gas de síntesis, sobre la base de la configuración anteriormente mencionada "gasificador de calor". Sólo unos pocos, particularmente en Japón, utiliza una configuración

"gasificación de poder o potencia " son utilizados para producir productos químicos (en particular amoníaco) (Steiner y col., 2002). Una lista de algunas empresas seleccionadas (Alter NGR (Canadá), Ebara TIFG (Japón), Energos (Norway, UK), Hitachi Zosen (Japón), Kobelco (Japón), Mitsui (Japón), Nippon Steel Engineering (Japón), Plasco Energy Group (Canadá), Takuma (Japón).) que en total tiene en funcionamiento más de 100 gasificadores y son capaces de ofrecer un proceso de gasificación probado para diferentes tipos de residuos sólidos. Con referencia a su rango de la capacidad, es interesante observar que la principal razón de los valores relativamente bajos de la capacidad máxima de los gasificadores de RSU está probablemente relacionado con las directrices del gobierno de Japón, donde la tecnología de gasificación fue primero utilizada en gran parte. Gobiernos municipales japoneses son en principio, necesario para tratar los desechos dentro de sus propios territorios para que las plantas residuos a energía tienen una capacidad media reducida (alrededor de 70 k ton/año), mucho menor que la de las plantas de los europeos (Suzuki y Nagayama, 2011).

### ***Gasificadores de lecho fijo (corriente ascendente y corriente descendente).***

En un gasificador de lecho fijo (o lecho fluidizado) una cama profunda de los residuos está presente en casi todo el volumen del reactor y en sus diferentes zonas se pueden distinguir con una secuencia que depende de la dirección del flujo de los residuos y el agente de gasificación. Estas zonas no son fijas físicamente y se mueven hacia arriba y hacia abajo en función de las condiciones de funcionamiento, de modo que puedan ser en cierta medida superpuestas. En los reactores de corriente ascendente los residuos son introducidos en la parte superior del gasificador, y la inyección del agente oxidante en la parte inferior, de manera que los residuos se mueven en contracorriente a los gases y pasa a zonas diferentes (secado, pirólisis, reducción y oxidación) sucesivamente. El combustible se seca en la parte superior del gasificador, de modo que los residuos con alto contenido de humedad se pueden utilizar. Algunos de los carbonizados se queman para proporcionar calor. El metano y el gas rico en alquitrán quedan en la parte superior del gasificador, y la ceniza cae de la parrilla del hogar y es recogida en la parte inferior del gasificador. En los reactores de corriente descendente, se alimenta de los residuos en la parte superior del gasificador, mientras que el agente oxidante desde la parte superior o los lados: después, los residuos y los gases se mueven en la misma dirección. Es posible distinguir las mismas zonas de los gasificadores de aire ascendente, pero en un orden diferente. Algunos de los residuos se queman y caen a través de la garganta del gasificador para formar un lecho de carbón caliente que los gases tienen que pasar a través de ellos. Esto asegura un gas de síntesis bastante alta calidad (con un contenido relativamente bajo en alquitrán), lo que deja en la base del gasificador, ceniza recolectada debajo de la parrilla del hogar.

### ***Gasificadores de lecho fluidizado Burbujeante o circulante.***

En un lecho fluidizado burbujeante (BFB por sus siglas en inglés Bubbling Fluidized Bed), el flujo del agente oxidante gaseoso (aire, oxígeno, aire enriquecido en oxígeno o vapor de agua) se sopla hacia arriba a través de una placa distribuidora e impregna un lecho de material inerte (típicamente arena de sílice o de olivino) situado en el gasificador en la parte inferior que contiene los residuos a tratar (Arena y Mastellone, 2005). La velocidad superficial del gas (la relación entre la tasa de flujo volumétrico del gas y el área de sección transversal) es generalmente alrededor de 1 [m/s], es decir, varias veces mayor que el valor (llamada velocidad mínima de fluidización) que hace que las fuerzas de arrastre sobre las partículas se igualen al peso de las partículas en la cama y esto le da un comportamiento similar a un fluido (Kunii y Levenspiel, 1991). Este estado similar a un fluido produce una mezcla intensa de gas y sólido que permite una muy alta transferencias de masa y calor. Todas las propiedades principales del sistema están estrechamente relacionadas con el papel crucial que juega la hidrodinámica en el diseño y el funcionamiento de un lecho fluidizado (Kunii y Levenspiel, 1991; Gracia, 1986; Arena y Mastellone, 2005). No hay partes móviles en el interior del reactor, y por esto, el mantenimiento es simple y relativamente barato. Los residuos que alimentan al gasificador generalmente sobre la cama desde uno o más puntos a lo largo de las paredes laterales, se calientan rápido, volatilizan y reaccionan. La mayor parte de la reacción de gasificación se produce cerca de la parte superior de la cama, donde se encuentra la máxima turbulencia inducida por la erupción de burbujas (Mastellone y Arena, 2008; Arena et al, 2010). El gas de síntesis producido se mueve hacia arriba a lo largo del francobordo (el espacio vertical por encima de la altura del lecho) y abandona el reactor. Un gasificador de lecho fluidizado burbujeante (BFB) opera a temperaturas inferiores a 900°C hasta evitar la fusión de ceniza y de sinterización que puede determinar un empeoramiento de la calidad de la fluidización y en algunos casos la desfluidización de la cama.

### ***Gasificadores de flujo arrastrado.***

Estos reactores operan comúnmente a altas presiones, aproximadamente 25 [bar]. Se utilizan para tratar el carbón, pero también residuos de refinería y residuos plásticos mixtos, ya que estos pueden ser suspendidos para hacer la alimentación del combustible sólido a altas presiones y este tienen un contenido de energía suficientemente alto para mantener la reacción de gasificación (con la adición de combustible si es necesario). En un gasificador de flujo arrastrado, se añaden partículas finas de combustible (más pequeños que 1 [mm], generalmente obtenidos por un proceso de molido) son agregados con agua para producir el compuesto acuoso, con una concentración de sólidos mayor del 60%. El agua sirve como un medio de transporte y como el moderador de temperatura, incluso como un reactivo, ya que promueve la formación de hidrógeno. Se alimenta del compuesto acuoso a un

gasificador con oxígeno presurizado (o aire). Una flama turbulenta en la parte superior del gasificador quema parte del combustible proporcionando grandes cantidades de calor, a alta temperatura (1200-1500 °C , de todos modos por encima de la temperatura de fusión de ceniza) para la conversión rápida de residuos en un gas de síntesis de alta calidad. La ceniza se funde sobre las paredes del gasificador, y se descarga como escoria fundida en la cámara de enfriamiento rápido, los metales presentes se encapsulan en la escoria enfriada (NETL, 1995).

### ***Gasificadores de horno giratorio.***

Este reactor es muy usado en varias aplicaciones, procedentes de la incineración de residuos industriales para la producción de cemento. El concepto de horno giratorio logra dos objetivos simultáneamente: el movimiento de sólidos dentro y fuera de una zona de reacción de alta temperatura y la mezcla de los sólidos durante la reacción. El horno está típicamente compuesto de un armazón cilíndrico de acero forrado con material refractario resistente a la abrasión para evitar el sobrecalentamiento del metal. Generalmente ligeramente inclinado hacia el extremo de descarga (aproximadamente 0.03 [m/m]), y el movimiento de los sólidos que comienzan a ser procesados se controla por la velocidad de rotación (aproximadamente 1,5 [rpm]). Los hornos rotatorios se utilizan como primera etapa de un proceso de dos pasos en el proceso de Mitsui de reciclaje. Los residuos se gasifican a 450 °C en un tambor de gasificación y se convierte en gas y carbón con otros residuos de metales, cenizas y escombros. Después de la separación y la recuperación de aluminio, hierro y otros residuos, la corriente de salida se introduce en una cámara de combustión de alta temperatura y es quemada a 1300 °C y a una baja relación de exceso de aire (alrededor de 1,2), donde la ceniza también se funde (UCR, 2009). Los residuos se gasifican con aire de alta temperatura obtenido en un calentador de aire a alta temperatura, entonces no se necesita ningún combustible externo adicional. La recuperación de hierro, aluminio y escoria que se puede vender, conduce a una proporción muy elevada de reducción del volumen de residuos, lo que puede llegar a 1/200 del volumen de los residuos originales (JAEE, 2011).

Un proceso similar es ofrecido por Takuma que son gasificadores de parrilla móvil. Las parrillas mecánicas es el tipo de reactor más utilizado para las unidades de residuos a electricidad basados en la combustión. Esta parrilla es de flujo constante y alimenta la basura continuamente desde la tolva de alimentación de residuos al horno incinerador, la parrilla proporciona el movimiento de la cama de desperdicios y los residuos de cenizas van hacia el extremo de descarga de la parrilla lo que hace poco de atizar y mezclar el material en llamas en las parrillas. El horno de parrilla se ha propuesto recientemente para el proceso de gasificación por Energos (que tiene varias plantas en operación en Noruega, Alemania y Reino Unido) para mejorar la flexibilidad de combustible de los gasificadores de

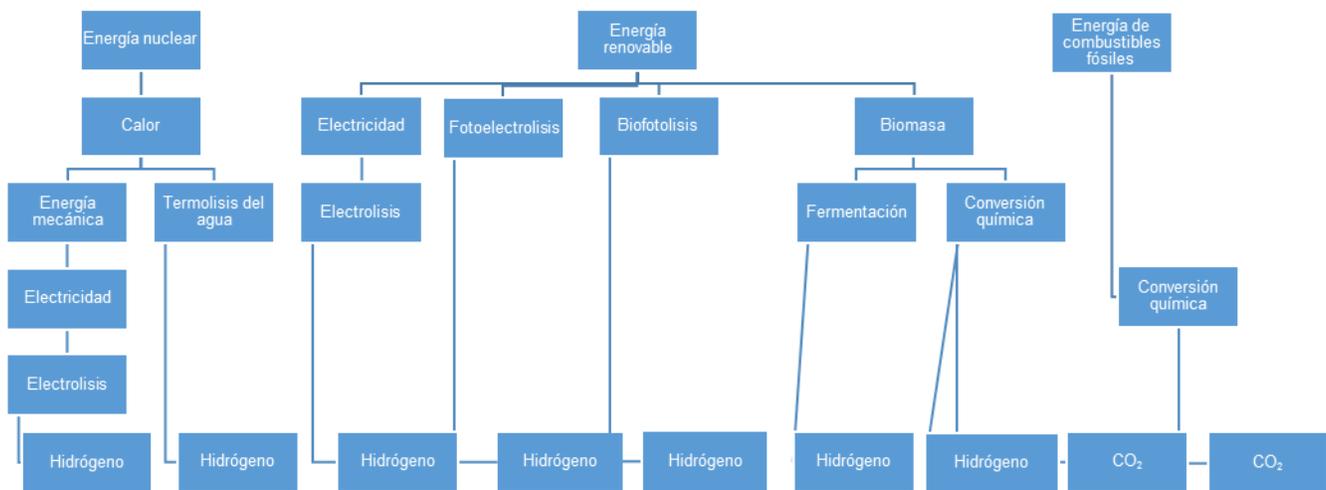
RSU (Okuwaki, 2004). La conversión térmica tiene lugar en dos etapas: la cámara primaria para la gasificación de los residuos (típicamente a una relación de equivalencia de 0.5) y la cámara secundaria para la oxidación a alta temperatura de los gas de síntesis producido en la cámara primaria. La unidad de gasificación está equipada con una parrilla de aceite de refrigeración horizontal que se divide en varias secciones separadas, cada una con un suministro de aire primario por separado y una guillotina que es de refrigerado por agua que está instalado en la entrada de la unidad de gasificación para controlar el espesor de la cama de combustible. La oxidación en la cámara secundaria se ve facilitada por múltiples inyecciones de aire y gas de combustión reciclado (Grimshaw y Lago, 2010).

### ***Gasificadores de plasma.***

Los residuos sólidos no tratados se dejan caer en el gasificador, a menudo un gasificador de lecho móvil, que entra en contacto con un plasma generado con electricidad, por lo general a presión atmosférica y temperaturas de 1500 a 5000 °C. La materia orgánica se convierte en un gas sintético de alta calidad, y la materia inorgánica se vitrifica en escoria inerte. Los gasificadores de plasma usan sopletes de plasma y las instalaciones de gasificación por plasma requieren una gran cantidad de electricidad para operar la antorcha de plasma. Por lo general, se indica que es necesario sobre 1200-2,500 [MJ/ ton residuo], que está en el rango de 5-10 % de la energía de los residuos de alimentación. Estos consumos eléctricos están en el orden de 15-20 % de la producción bruta de electricidad de la planta (Williams et al, 2003; Lombardi et al, 2012; Hetland et al, 2011). A pesar de que el plasma se utiliza típicamente para valorizar residuos sólidos en un proceso de una sola etapa, también hay un enfoque de dos etapas bastante diferente. La primera etapa utiliza un gasificador convencional mientras que la segunda etapa se utiliza un gasificador de plasma para reducir el contenido de alquitrán en el gas de síntesis y aumentar la eficiencia de conversión.

### **El hidrógeno.**

En los últimos años el hidrógeno (H<sub>2</sub>) ha sido objeto de muchos estudios ya que es un combustible con alto poder calorífico y es el elemento que más abunda en el universo aunque en el planeta no es posible encontrarlo en estado libre, es posible obtenerlo de varias fuentes como el gas natural, el carbón, energía nuclear, energías renovables ya que no es un recurso natural como los recursos fósiles en general. En el diagrama 2 podemos observar las formas de energía que se conocen en la actualidad y las formas de obtención de hidrógeno a través de ellas.



**Diagrama 2. Procesos de obtención del hidrógeno.**

**Fuente: El hidrógeno y la energía. Análisis de la situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas 2007.**

Desde el siglo pasado y en la actualidad vivimos la época del carbón como combustible y uno de ellos es el gas natural, con esto podemos ver que conforme ha pasado el tiempo nuestros combustibles que usamos han ido incrementando en su cantidad de hidrógeno. Con estos puntos podemos ver que el hidrógeno tiene una carrera contra el carbono como combustible,

El hidrógeno es un elemento que su energía química puede ser transformada de forma directa a energía eléctrica, sin el paso intermedio del accionamiento térmico de un ciclo de potencia por medio de una celda de combustible, también, los motores combustión interna pueden transformar la energía química de hidrógeno en energía mecánica.

En la Figura 33 se representan las fuentes energéticas de las que se obtiene el hidrógeno actualmente, produciéndose casi la mitad a partir del gas natural. En concreto, el 96% del hidrógeno requiere como energía primaria combustibles fósiles, siendo el 95% de la producción “cautiva”, es decir, se produce para consumo propio de las industrias que lo demandan. En la Figura 34 se muestran los usos que actualmente se dan al hidrógeno, siendo de tipo químico el 72% y nada para fines energéticos. Estas cifras demuestran que los sistemas productivos actuales no están preparados para satisfacer las demandas de la “sociedad del hidrógeno”, siendo preciso actualizarlos.

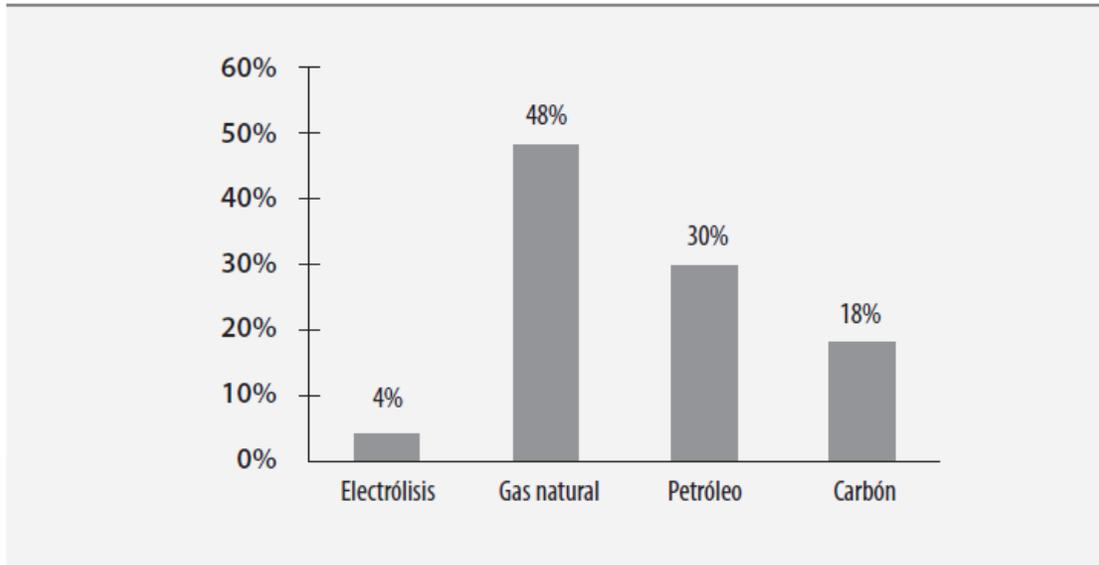


Figura 44. Origen del hidrógeno producido en la actualidad.

Fuente: El hidrógeno y la energía. Análisis de la situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas 2007.

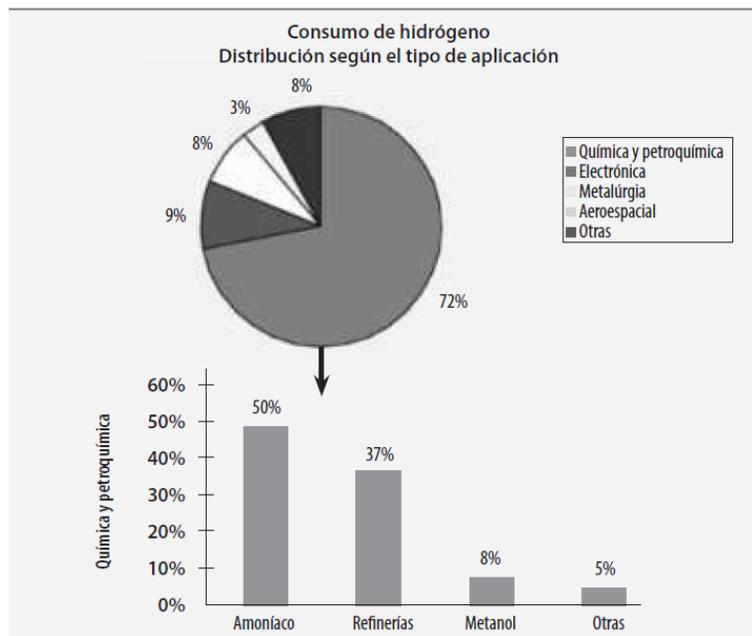


Figura 45. Consumo del hidrógeno y distribución según el tipo de aplicación.

Fuente: El hidrógeno y la energía. Análisis de la situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas 2007.

Nuestra dependencia por los combustibles fósiles es muy alta y se les da un tiempo de vida finito a su explotación masiva; esto nos da cabida a que el hidrógeno sea un posible combustible potencial para sustituir a los combustibles fósiles. Algunas ventajas ambientales del hidrógeno son que al quemar el hidrógeno no produce emisiones de CO<sub>2</sub>, solo produce vapor de agua si el combustible se quema con

oxígeno puro, pero en algunos casos de combustión produce  $\text{NO}_x$  ya que el hidrógeno al mezclarse con aire se pueden formar estos compuestos ya bien conocidos, pero para contrarrestarlo se está controlando las temperaturas de combustión ya que las altas temperaturas son las que determinan su producción. La quema de hidrógeno como combustible ya se lleva a cabo tanto en motores de combustión interna como en turbinas de gas.

Así mismo en varios países como Estados Unidos de América y la unión Europea ya se apuesta por el hidrógeno como el combustible del transporte en el futuro y hay programas que incentivan el estudio sobre el compuesto para facilitararlo como combustible de transporte y en algunos estados del país ya está disponible como tal.

El hidrógeno también es no tóxico, lo que lo hace una rareza entre la cantidad de combustibles disponibles. La energía nuclear, el carbón y la gasolina todos ellos son combustibles tóxicos o se encuentran en ambientes tóxicos. Esto hace que el hidrógeno sea un combustible ideal para su uso en diversas formas y muchas otras fuentes no puedan competir con él. El hidrógeno es un combustible muy eficiente aún en mayor cantidad comparada con otras alternativas ya que produce mayor energía por unidad de masa de combustible, lo que significa que un auto puede ser llenado con hidrógeno con lo que puede ir mucho más lejos utilizando la misma cantidad en masa comparado con fuentes tradicionales de energía.

## **El simulador de procesos ASPEN Plus.**

La simulación del proceso de gasificación de los RSU fue realizada en el programa ASPEN Plus el cual se puede adecuar a cualquier tipo de proceso que sea requerido.

En primera instancia se tiene que se utilizó la versión ASPEN Plus V8.4. Para poder simular el proceso se necesita primero definirlo, el proceso usado es un proceso de obtención de Hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) el cual se investigó en bibliografía. El programa ASPEN plus es un software utilizado en tanto en la industria como en la investigación de procesos. ASPEN plus tiene un criterio muy amplio que se puede describir de la siguiente manera:

Para poder comenzar con el uso de ASPEN plus primero se debe de definir el proceso a estudiar, crear la simulación definiendo parámetros y construir el proceso en una hoja de flujo como así mismo lo llama el programa.

Para poder definir el proceso se deben de definir los componentes a utilizar y los fluidos de trabajo que serán recursos (combustibles, fluidos de trabajo, etc.) y productos (gases, desechos, fluidos de trabajo, trabajo, energía, etc.) que se tendrán durante todo el proceso. Este programa tiene la capacidad de

poder trabajar corriendo simulaciones de procesos contruidos, procesos con electrolitos, procesos de petróleo, procesos personalizados de unidades de operación, procesos con sólidos, etc.

Aspen plus se basa en técnicas para resolver procesos que han sido empleados por ingenieros durante mucho tiempo. La solución viene dada por un tipo de enfoque el cual se le llama enfoque modular secuencial. El enfoque modular secuencial toma como base el diseño de cada operación unitaria en nuestro diagrama de proceso, cada operación unitaria debe ser diseñada teniendo en cuenta que el ingeniero manualmente diseña cada operación unitaria introduciendo los valores necesarios para la solución de un diseño previo, tomando cada operación unitaria como valores de entrada los resultados del flujo analizado de la salida de la operación unitaria anterior. Cuando es necesario trabajar con una recirculación, los cálculos comienzan con una suposición de los valores de recirculación y los valores terminan cuando se llega a la convergencia del ciclo o lazo diseñado. Esto nos dice que hay mucho trabajo repetitivo pero la convergencia no se garantiza. Este procedimiento se desarrolló mediante la construcción de modelos de medición de las unidades, en oposición a diseñar modelos, que podrían ser unidos por el software de una manera que emula el procedimiento anterior y emplea métodos matemáticos robustos para converger los elementos de recirculación del proceso. Este tipo de sistema se denomina un simulador modular secuencial.

Entre las operaciones unitarias de ASPEN plus se tienen algunas como lo son: Reactores, Bloques de separación y bloques de Flasheo, los cuales fueron utilizados en este trabajo de tesis y en los próximos párrafos se describe su lógica matemática y química.

## **Reactores.**

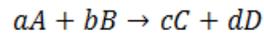
ASPEN plus provee 7 diferentes modelos que trabajan como reactores químicos en diferentes formas:

1. RStoic: un reactor de base estequiometrica con extensión de reacción especificada.
2. RYield: un reactor basado en campos específicos.
3. REquil: un reactor de equilibrio riguroso basado en la estequiometria de reacción.
4. RGibbs: un reactor de equilibrio riguroso que incluye el equilibrio de fases minimizando la energía libre de Gibbs.
5. RCSTR: un tanque continuamente agitado que controla la velocidad de reacción mediante cinética especificada.
6. RPlug: un reactor Plug para flujo con velocidades controladas con cinética especifica de reacción.
7. RBatch: Reactor Batch y Semibatch que controla la velocidad de reacción mediante cinética especificada.

En nuestro proceso se utilizaron los reactores RStoic, RYield y RGibbs los cuales trabajan mediante:

### **Bloque RStoic.**

El bloque RStoic es uno de los bloques que trabajan como reactor más simples en ASPEN plus. Permite el uso de muchas reacciones con extensión molar de conversión o conversión fraccional de un componente, especificado en cada reacción, para la reacción:



la extensión molar de reacción X se define por:

$$X = -\frac{\Delta n_a}{a} = -\frac{\Delta n_b}{b} = \frac{\Delta n_c}{c} = \frac{\Delta n_d}{d}$$

donde  $\Delta n_i$  son las moles del componente i creadas o consumidas. Las ecuaciones de balance de materia que se aplican con las alimentaciones o productos del componente i, se definen como  $F_i$  y  $P_i$  respectivamente, son para un reactante, por ejemplo si i es el componente A:

$$P_i = F_i - aX$$

y para el producto de reacción, por ejemplo si i es el componente D:

$$P_i = F_i + dX$$

En la figura 35 podemos ver un reactor RStoic. Los parámetros que necesita para poder trabajar este reactor son: presión, temperatura, reacción o reacciones con conversión conocida.

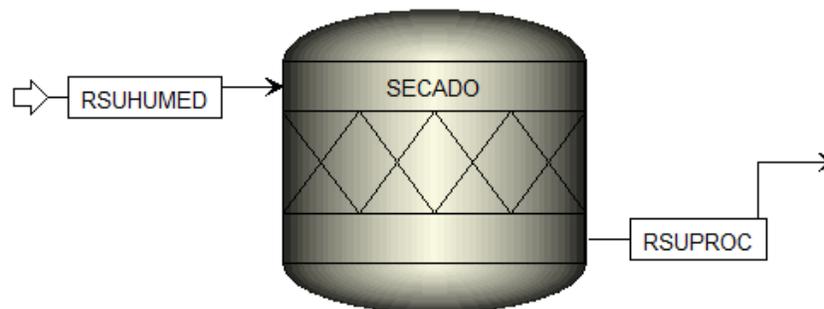


Figura 46. Reactor RStoic ASPEN plus.

### **Bloque RYield.**

El bloque RYield se utiliza cuando la distribución de productos es conocida. Este reactor no maneja estequiometría de reacción. El reactor maneja dos opciones: especificación de los campos de los componentes o especificación del mapeo de los componentes. Para la especificación de los campos de los componentes el campo del producto de cada reacción se especifica al igual que las moles o la masa por unidad de masa de la alimentación. Un componente debe ser especificado como inerte. Los campos serán basados en unidad de masa de la alimentación no inerte. Los campos calculados se normalizan para mantener un balance de masa. A causa de esto, la especificación de los campos se expresa como proporciones de los componentes del producto del reactor. Especificaciones de campo da como resultado una distribución de campo en lugar de campos absolutos.

### **Bloque RGibbs.**

El bloque RGibbs puede ser utilizado para establecer el equilibrio químico en la composición entre reactantes y productos. Considerando la reacción del isómero A al isómero B dada una presión y temperatura. Para una mezcla de  $n$  componentes donde  $x_i$  es la fracción mole del componente  $i$  la energía libre de Gibbs  $g_{mix}$  está dada por:

$$g_{mix} = \sum x_i + RT \sum x_i \ln x_i$$

Diferenciando la ecuación con respecto a  $x_a$  y sabiendo que para una mezcla de dos componentes  $x_b = 1 - x_a$ , se obtiene:

$$\frac{dg_{mix}}{dx_a} = g_a^o - g_b^o + RT \frac{x_a}{1 - x_a}$$

El mínimo de  $g_{mix}$  se puede encontrar igualando la última ecuación a cero y resolviendo para  $x_a$ . El mismo procedimiento se puede utilizar para equilibrio químico y de fases.

Para poder usar un modelo riguroso de reacciones es necesario definir completamente las reacciones a utilizar en el modelo, el reactor de RGibbs permite al usuario definir varias reacciones y entre ellas llegar al equilibrio.

## Separadores de flujo.

### Bloque Flash 2.

La figura 36 muestra un flash 2. La nomenclatura utilizada en el bloque Flash 2 es de la siguiente manera:  $F$  representa el total de flujo de alimentación medida en [moles/tiempo],  $f_i$  el flujo del componente  $i$  en la alimentación medida en [moles/tiempo],  $V$  el flujo total de vapor medido en [moles/tiempo],  $v_i$  el flujo del componente  $i$  en el vapor en [moles/tiempo],  $L$  el flujo total líquido en [moles/tiempo],  $l_i$  el flujo del componente  $i$  en el líquido en [moles/tiempo] y  $n$  el número de componentes. Incluyendo la temperatura de flasheo  $T_f$  y la presión  $P_f$

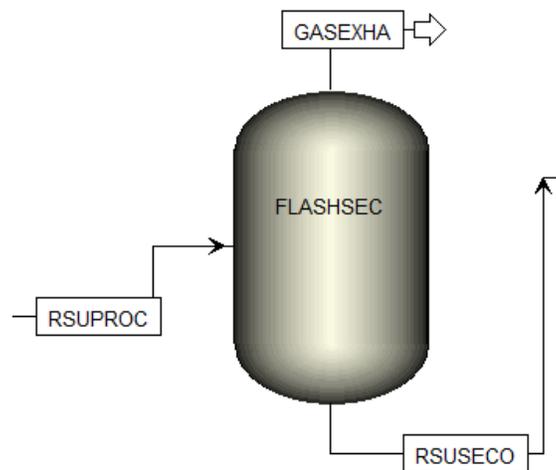


Figura 47. Tanque Flash en ASPEN plus.

La fracción molar se calcula de las variables independientes por la ecuación siguiente:

$$y_i = \frac{v_i}{\sum_{j=1}^n v_j}$$

donde  $y_i$  es la fracción molar del componente  $i$  en el vapor. El balance de materia para cada componente es:

$$f_i - v_i - l_i = 0$$

o alternativamente, un balance de materia general está dado por:

$$F - V - L = 0$$

adicionalmente, las  $n$  ecuaciones de equilibrio que describen la igualdad de las fugacidades de los componentes en la fase requerida. Cuando la fugacidad del líquido es representada por una ecuación de estado donde  $\phi_i^L$  y  $\phi_i^V$  son los coeficientes de fugacidad del componente  $i$  en las fases líquido y vapor respectivamente, el resultado es:

$$y_i \phi_i^V - x_i \phi_i^L = 0$$

Cuando la fugacidad del líquido es representada por una ecuación de coeficiente de actividad donde  $\gamma_i$  es el coeficiente de actividad del componente  $i$  y la fase vapor se representa por una ecuación de estado:

$$y_i \phi_i^V P - \gamma_i x_i p_i^v = 0$$

donde  $p_i^v$  es la presión de vapor del componente  $i$  como resultado. Con el objeto de simplicidad la corrección de Poynting (Prausnitz, 1999) que tiene una contribución única para los componentes muy ligeros, fue omitida.

Un balance general de energía donde  $h$  con un subíndice adecuado representa la entalpia de alimentación, líquido y vapor respectivamente y  $Q$  representa el calor transferido está dado por:

$$h_f F + Q - h_l L - h_v V = 0$$

### **Bloque Separador (Sep2 Block).**

El bloque separador está diseñado para una separación de dos productos, parecido este proceso a los procesos de destilación o extracción. El uso de este bloque se describe cuando el flujo de una corriente de alimentación se mezcla y la tasa de flujo, la composición y la entalpía molar se calculan. Para  $n$  corrientes de producto, el bloque permite la asignación del caudal de los flujos o la fracción de componente dividida de cada componente en cada corriente de producto de  $n-1$  corrientes, en base a las alimentaciones combinadas. Las especificaciones habilitadas es que en la corriente total dividida, es decir, la relación de flujo de una corriente de producto a la suma de los flujos de las alimentaciones y la fracción masa o fracción mol de un componente en una corriente producto. La composición de la  $n$ -ésima corriente se calcula mediante un balance de masa total. La especificación de la fracción mol está dada por:

$$x_i^j = \frac{f_i^j}{\sum_{k=1}^l f_k^j}$$

donde  $x_i^j$  representa la fracción mol especificada del componente  $i$  en la corriente producto  $j$ , cuando  $l$  es el número de componentes.

La ecuación que describe la especificación de flujo total es:

$$\beta_j = \frac{\sum_{k=1}^l f_k^j}{\sum_{m=1}^p F_m}$$

donde  $\beta_j$  es el total de la fracción dividida de la corriente  $j$  a la suma de todos los flujos de todas las  $p$  alimentaciones.  $F_m$  representa la suma de los flujos de todos los componentes en la corriente de alimentación  $m$  y,  $l$  representa el número de componentes.

En la figura 37 podemos ver la representación esquemática de un separador 2 llamado así porque su función es separar en dos corrientes con compuestos en composiciones diferentes.

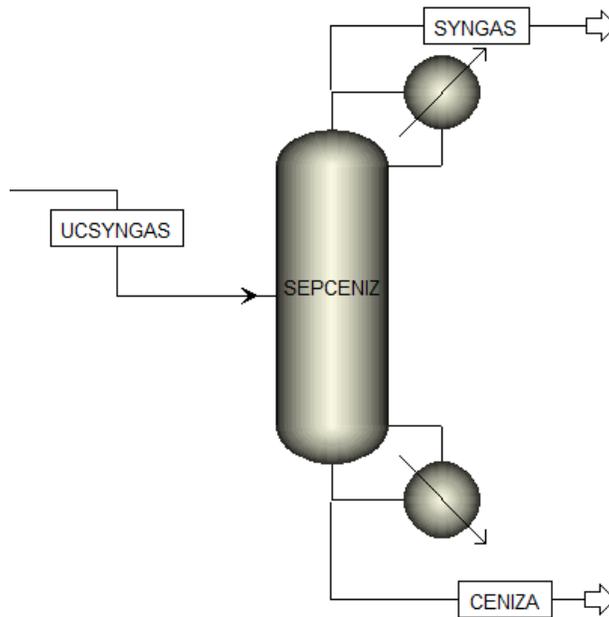


Figura 48. Bloque separador (Sep 2) ASPEN plus.

# CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO EN ASPEN PLUS.

En este capítulo se analiza el proceso de gasificación, las reacciones que ocurren en el proceso, la caracterización de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), como se utilizó el software ASPEN plus para simular el proceso, las características del proceso, los parámetros importantes de la gasificación y la validación científica del presente estudio

## Proceso de gasificación.

El proceso de gasificación consiste en convertir un combustible sólido en gases que se pueden aprovechar para su uso como la generación eléctrica turbina de gas o al separar esos gases se podrían utilizar para transporte y otros usos industriales como la producción de energía eléctrica o la industria petroquímica.

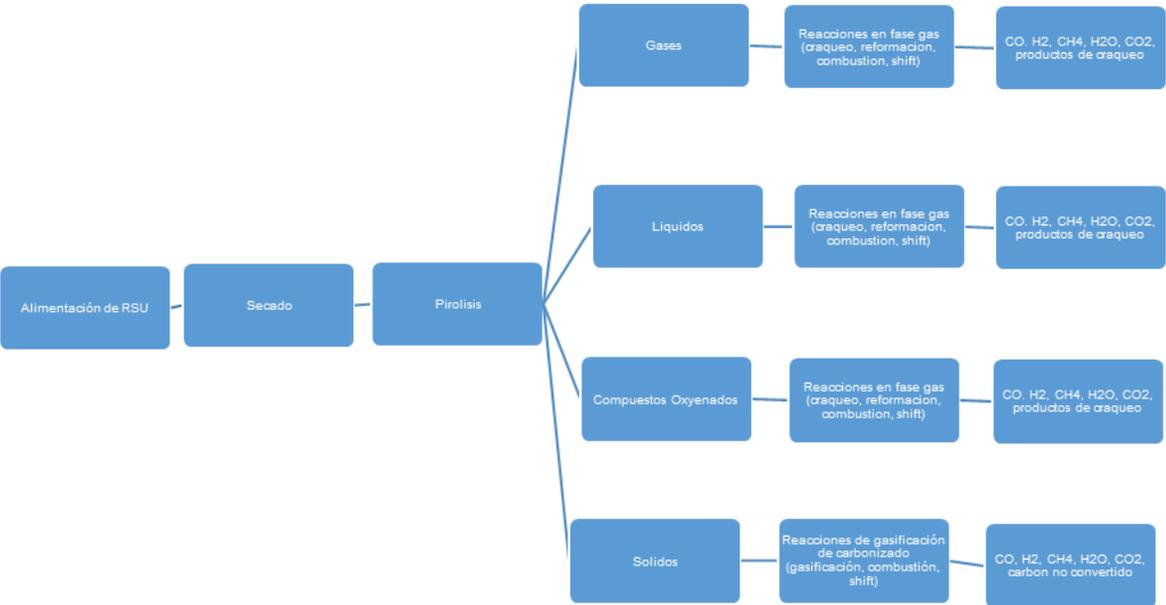


Diagrama 3. Proceso de gasificación.

Fuente: Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Prabir Basu 2010.

## **Influyente.**

El influente o fluido a procesar en nuestro caso son Residuos Sólidos Urbanos (RSU o MSW por sus siglas en inglés de Municipal Solid Waste). La cantidad en masa del fluido analizado fue de 40 [kg/h] ya que el gasificador instalado en el Laboratorio de Gasificación de la UNAM es el flujo máximo que permite en su alimentación.

Para poder caracterizar el influente se requieren propiedades elementales ya que los RSU contienen un gran número de componentes orgánicos como Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Sulfuro (S), Cloro (Cl) y una pequeña cantidad de componentes inorgánicos que son impuros y se les conoce como ceniza (ASH). Para poder utilizar térmicamente los RSU se necesita necesariamente la composición y también su contenido energético. Los análisis primarios que describen la composición y el contenido energético son: Análisis Último, Análisis Próximo y Poder Calorífico. La determinación experimental de estas propiedades se cubre con la norma ASTM Standard E 870-06.

## **Análisis Último.**

En este análisis la composición del combustible de hidrocarburos se expresa en términos de elementos básicos a excepción de la humedad (MC) y los compuestos inorgánicos (ASH o ceniza), un análisis último típico es:

$$C + H + O + N + S + ASH + MC = 100\%$$

Aquí C, H, O, N y S son porcentajes en masa de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y sulfuro respectivamente en el combustible. Las normas ASTM Standard para el análisis de los componentes son: Carbono, Hidrógeno: E-777 para RDF, Nitrógeno: E778 para RDF, Sulfuro: E-775 para RDF, Humedad MC: E-871, Ceniza ASH: D-1102.

El análisis es llevado a cabo mediante el quemado de la muestra a 1273 K en una atmósfera de oxígeno. El porcentaje en masa es dado por la composición de los gases finales. En México para realizar esta prueba se debe basar en la norma "NMX-AA-018-1984".

## **Análisis Próximo.**

El análisis próximo da la composición de los combustibles en términos generales de componentes como lo son la humedad (MC), Materia Volátil (VM), ceniza (ASH) y carbono fijo (FC). Las normas que se usan para determinar los contenidos de cada componente son: Materia volátil: E872, Ceniza: D-1102, Humedad: E-871, Carbono Fijo: se determina por diferencia.

### *Materia Volátil.*

La materia volátil (VM) de un combustible es el vapor condensable y no condensable cuando el combustible se calienta. Su cantidad depende de la razón de calentamiento y de la temperatura a la que es calentado. Para determinar la materia volátil se calienta a una temperatura estándar y a una razón estándar de calentamiento en un ambiente controlado.

### *Ceniza.*

La ceniza (ASH) es el residuo sólido inorgánico que sobra después de que el combustible es completamente quemado, sus componentes principales son sílice, aluminio, hierro y calcio, también se pueden presentar pequeñas partes de magnesio, titanio sodio y potasio.

### *Humedad.*

El contenido de Humedad (MC) se determina probando una muestra con peso y se calienta en un horno de aire a una temperatura de  $103^{\circ}\text{C}$  por un tiempo determinado y después se pesa cuando es enfriado. Para asegurar que no se tiene más humedad el combustible es vuelto a probar hasta que no se tengan diferencias de peso, La diferencia en peso entre la muestra seca y la muestra húmeda nos da la cantidad de humedad contenida en el mismo. En México hay una norma para medir la cantidad de humedad en un material y la norma es la “NMX-AA-016-1984” que especifica que la muestra debe de ser homogénea y con un tamaño de partícula de 5 centímetros.

### *Carbón fijo.*

El carbón fijo (FC) en un combustible es determinado de la siguiente ecuación donde MC, VM y ASH son para humedad, materia volátil y ceniza respectivamente.

$$\text{FC} = 1 - \text{MC} - \text{VM} - \text{ASH}$$

Esta cantidad representa el carbón sólido en la biomasa que contiene el CHAR o carbonizado en el proceso de pirolisis después de la volatilización.

### *CHAR.*

CHAR o carbonizado es carbón residual de la pirolisis, no es carbón puro, este compuesto se conoce como “carbonizado pirolítico” y contiene algunos componentes volátiles y ceniza en conjunto con el carbón fijo.

### **Efluente.**

Es el resultado de la gasificación que en su mayoría son gases como  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCL}$ , también se incluye humedad y vapor. Su composición puede ser expresada en alguna de las siguientes maneras: fracción masa ( $m_i$ ), fracción mol ( $n_i$ ), fracción volumétrica ( $V_i$ ), presión parcial ( $P_i$ ).

También pueden ser expresados en una base seca o húmeda. La base húmeda es la composición del gas expresado en la masa total de la mezcla de gases incluyendo humedad en ella. La base seca es la composición con la humedad completamente removida.

### **Poder Calorífico.**

El poder calorífico de un combustible se divide en dos tipos los cuales son:

*Poder calorífico superior (PCS o HHV por sus siglas en ingles de High Heating Value).* Es definido como la cantidad de calor liberado por unidad de masa o volumen del combustible que esta inicialmente a temperatura ambiente y una vez combustionado y los productos regresan a la temperatura de referencia. Incluye el calor latente de vaporización del agua. El poder calorífico superior se puede medir con una bomba calorimétrica usando la norma ASTM standard D-2015

*Poder calorífico inferior (PCI o LHV por sus siglas en ingles de Low Heating Value).* Se define como la cantidad de calor liberado por la totalidad de la cantidad de las especies combustibles menos el calor de vaporización del agua en los productos de la combustión.

### **Relación de equivalencia. (ER o Equivalence Ratio).**

El Equivalence Ratio se define como la relación entre la cantidad de aire que actualmente se utiliza comparado con la cantidad estequiometrica de aire para la combustión completa. La relación de equivalencia es un parámetro que en la literatura nos dice en qué punto se encuentra el óptimo de producción de gas de hidrógeno en la gasificación.

La relación para calcular el ER es la siguiente:

$$ER = \frac{m_{aire\ real}}{m_{aire\ estequimetrico}}$$

donde  $m_{aire\ real}$  es el flujo másico de aire que se le inyecta al gasificador y  $m_{aire\ estequimetrico}$  es la cantidad de aire necesario para que la combustión tenga estequiometria.

### **Eficiencia de gas frio. (CGE o Cold Gas Efficiency).**

La eficiencia de los gases de salida de un gasificador se mide con el parámetro CGE, este parámetro se calcula mediante la relación de poderes caloríficos del influente y del efluente. El CGE se obtiene mediante la fórmula:

$$CGE = \frac{m_{gas} HHV\ gas}{m_{gas} HHV\ Combustible}$$

## Descripción del Proceso.

El proceso de gasificación tiene 4 etapas importantes las cuales se pueden dividir en:

- Secado.
- Pirolisis.
- Combustión parcial.
- Gasificación.

En el diagrama 3 podemos ver gráficamente como un gasificador funciona, sus etapas en las cuales se divide el proceso, el influente y el efluente obtenido.

### Secado.

El proceso de secado del combustible es muy importante ya que para que pueda ser un combustible apropiado para la combustión se necesita tener el combustible con cierta cantidad de humedad y esta cantidad de humedad se obtiene del análisis próximo del compuesto de estudio.

Para poder secar nuestro influente es necesaria energía y esa energía hay que suministrarla. Si tenemos un alto contenido de humedad (MC) que se proporciona en el análisis elemental del compuesto necesitaremos más energía para poder obtener en nuestro combustible o influente un mayor poder calorífico. Para obtener un combustible con un alto poder calorífico superior (HHV) muchos de los gasificadores usan el compuesto sólido con un contenido de humedad (MC) de 10% a 30% del contenido total de humedad en el análisis próximo del compuesto de estudio.

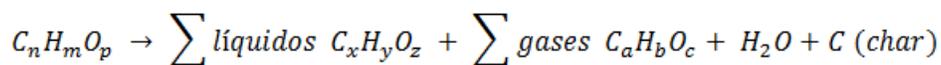
### Pirolisis.

La pirolisis que envuelve a cualquier tipo de combustible se lleva a cabo en ausencia de oxígeno y con una tasa específica que lleva a una temperatura máxima se lleva a cabo en un tiempo específico. La naturaleza de los productos depende de muchos factores incluyendo la temperatura de la pirolisis y la tasa de calentamiento del combustible.

La pirolisis es el proceso mediante el cual dentro del gasificador se descompone el influente en los compuestos que reaccionarán posteriormente. En la pirolisis envuelve un rompimiento térmico de largas cadenas de hidrocarburos de las moléculas del influente analizado y en el proceso las convierte en pequeñas moléculas de gas.

Los productos iniciales de la pirolisis son gases condensables y carbonizado sólido (CHAR), los gases condensables se pueden seguir rompiendo hasta obtener gases no condensables como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>), líquido y carbonizado.

El proceso de pirolisis puede ser representado por una reacción genérica:



La pirolisis es el proceso esencial antes de la gasificación. Este proceso es relativamente rápido.

Al descomponer los RSU como cualquier combustible sólido se tiene que se pueden dividir en 3 importantes conceptos:

- Gases: estos gases son compuestos como el O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, etc.
- Sólidos: es la parte solida del combustible que en este caso es Carbón y Carbonizado (CHAR) en conjunto con la ceniza del combustible (ASH).
- Líquidos: TAR (alquitranes), hidrocarburos pesados y agua.

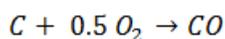
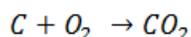
### **Combustión parcial.**

La combustión es cuando el Carbono (Char) reacciona con aire y se obtiene monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Esta reacción de combustión también es una reacción de gasificación ya que las reacciones químicas que se llevan a cabo convierten el Carbono solido en gases.

El Carbono solido (char) es producido en la pirolisis del combustible y no necesariamente es carbón puro, este contiene una cierta cantidad de hidrógeno, oxígeno, en su mayoría

Las reacciones de combustión del carbono son:



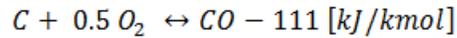
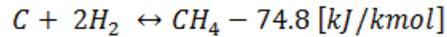
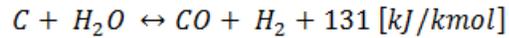
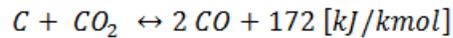
### **Gasificación.**

La gasificación es el proceso en el cual las reacciones químicas que ocurren dentro del reactor o gasificador se llevan a cabo para obtener gas de síntesis compuesto por hidrógeno (H<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), amoniaco (NH<sub>3</sub>), ácido clorhídrico (HCl), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) en su mayoría de componentes aunque en la realidad existen millones de reacciones y millones de posibles productos dependiendo mucho de la composición elemental del influente en un gasificador.

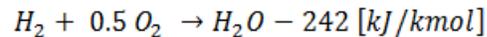
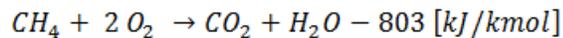
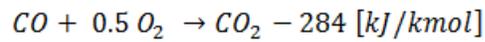
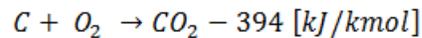
Las reacciones se pueden dividir en varios tipos, las reacciones generales y con mayor interés son: Reacciones de carbón, reacciones de oxidación, reacciones shift, reacciones de metanización, reacciones de reformación por vapor.

Las reacciones de Gasificación son las siguientes:

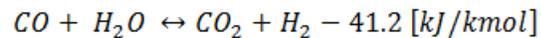
- Reacciones de carbón.



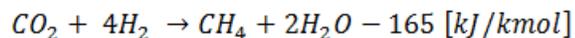
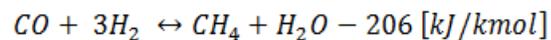
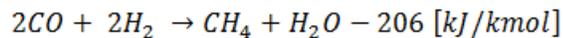
- Reacciones de Oxidación.



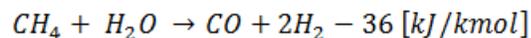
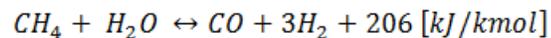
- Reacciones Shift.



- Reacciones de metanización.



- Reacciones de reformación por vapor.



**Fuente: Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Prabir Basu 2010.**

## **Proceso en ASPEN plus.**

ASPEN plus es un software especializado para procesos químicos. En la actualidad el software cubre mucho del campo de estudio de investigación y por eso se escogió para poder analizar los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y su gasificación.

Para el proceso en ASPEN plus es necesario conocer dos parámetros del combustible sólido a analizar:

- Análisis Próximo.
- Análisis Último.

Durante la simulación se utilizaron características especiales del software ASPEN plus para la determinación de la cantidad de hidrógeno. Estas características especiales son:

- Elementos no convencionales.
- Reactores.
- Calculadora.
- Programación en Fortran.

### **Elementos no Convencionales.**

Estos elementos se utilizan al no conocer la composición química del influente, ASPEN plus permite analizar cualquier tipo de compuesto utilizando los análisis elementales (próximo y último).

Como no se conoce exactamente la composición química de la basura se puede obtener un análisis elemental de la misma y ASPEN plus al tener esta composición calcula sus propiedades físicas y químicas. En la tabla 3 se presenta la composición de la basura que se analizó y sus análisis próximo y último.

Análisis último de los RSU de la Ciudad de México.	
Elemento	Composición % mol.
C Carbono	61.16
H Hidrógeno	15.41
O Oxígeno	7.45
N Nitrógeno	2.92
S Sulfuro	0.02
Ash Ceniza	13.04
MC Humedad	33.7
OR Orgánicos	49.5

**Tabla 3 Análisis último de los RSU en la Ciudad de México.**

**Fuente Mexico City's Municipal Solid Waste Characteristics and Composition Analysis 2012.**

### **Reactores.**

Para la simulación de Gasificación en ASPEN plus se utilizaron diferentes tipos de reactores ya que el software no tiene un Gasificador en específico. El proceso se divide en una serie de reactores los

cuales nos representan un proceso unitario de la gasificación. En la tabla 4 se describen cuáles y para que fueron utilizados los reactores de ASPEN plus.

Reactor	Descripción.
RSTOIC	El reactor Rstoic tiene dos funciones principales: Simulación de reacciones de combustión y reacciones donde se conoce su fracción de conversión o de producción de alguno de los elementos que participan en la reacción.
RYIELD	Este reactor se utiliza cuando se desconocen las reacciones químicas que se llevan a cabo, pero se conocen datos de la distribución de la formación de productos de la reacción, correlaciones, formulas empíricas, donde se determina la formación de cada uno de los productos.
RGIBBS	Este reactor calcula el equilibrio donde la energía mínima de Gibbs es el objetivo del reactor.

**Tabla 4 Reactores utilizados en el proceso de Gasificación para la obtención de hidrógeno.**

### **Calculadora.**

Una de las opciones de ASPEN plus es poder definir las propiedades de una corriente a través de cálculos programados en códigos de FORTRAN o EXCEL sin necesidad de crear una subrutina exterior, permitiendo ingresar correlaciones o ecuaciones que nos describen nuestro proceso de análisis.

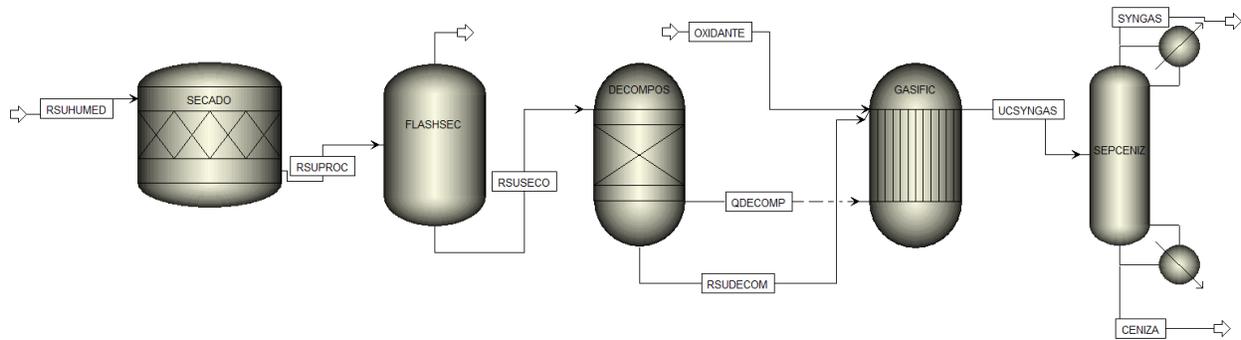
### **Descripción del Proceso analizado en ASPEN plus.**

El proceso de gasificación se dividió en 4 secciones:

1. Secado.
2. Descomposición.
3. Combustión parcial y Gasificación.
4. Separación de Gases y sólidos.

En cada una de las etapas se utilizaron investigaciones anteriores donde se analizaron Residuos Sólidos Urbanos al mismo tiempo que otro tipo de residuos sólidos como biomasa en ASPEN plus, los parámetros utilizados fueron reacciones (6), tipo de proceso (7), o algunas cosas específicas en procesos como en el secado (8) y algunos otros parámetros descritos en la sección 3.4 de este trabajo de tesis.

En el proceso se utilizaron varios bloques los cuales podemos ver en la figura 38:



**Figura 49. Proceso de Gasificación en ASPEN plus.**

Para poder analizar el combustible se utilizó el análisis último y próximo de los RSU encontrados en una investigación hecha en la Universidad Nacional Autónoma de México (9) en la cual caracterizan los residuos separándolos primero por áreas de la Ciudad de México por sus características físicas y químicas, luego se hace un promedio de cada análisis de estos experimentos. En la tabla 5 podemos ver la composición general de RSU en la ciudad de México, destacando que la mayoría de la composición física de los RSU tienen parte orgánica (49%), plásticos (13.16%), una cantidad importante de residuos sanitarios (10.77%), papel (5.89%) y cartón (4.03%).

Composición física de los RSU de la Ciudad de México.	
Categoría	%wt
Plásticos	13.16
Textiles	3.64
Orgánicos	49.5
Residuos Sanitarios	10.77
Papel	5.89
Cartón	4.03
Material de construcción	1.88
Material Ferroso	1.16
Madera	0.45
Polvos residuales	0.8
Aluminio	0.29
Vidrio	2.65
Residuo Especial	1.41
Residuo Peligroso	0.18
Otros	4.19

**Tabla 5 Composición física de los RSU en la Ciudad de México.**

**Fuente: Mexico City's Municipal Solid Waste Characteristics and composition analysis 2012.**

Para poder obtener los análisis próximo y último de los RSU se tomaron varias muestras, y se obtiene una muestra homogénea bajo la norma mexicana "NMX-AA-015-1985" que dice que hay que dividir el total de la muestra en 4 partes y descartar dos de ellas, después repitiendo el procedimiento hasta

obtener una muestra de 50 kg. Para la determinación de la composición física se hizo como lo describe la norma “NMX-AA-022-1985”. La clasificación de los subproductos fue basada en esta norma y fue modificada con categorías adicionales.

Al terminar los experimentos se obtuvieron resultados de composición de los RSU en el análisis último y próximo de los mismos, los resultados los podemos observar en las tablas siguientes donde la tabla 6 describe la cantidad de pruebas que se hicieron y nos da un promedio del análisis último de los RSU en tanto, la tabla 7 nos muestra que a la misma cantidad de material de prueba se le realizaron los test de humedad y de materia orgánica al igual que se determinó su peso volumétrico y su poder calorífico superior (PCS).

Estos datos se utilizaron para realizar las simulaciones en nuestro modelo de gasificación realizado en ASPEN plus, los datos utilizados fueron los datos promedio de los resultados de todas las pruebas.

El modelo analizado en ASPEN plus es un modelo de equilibrio libre de cinética el cual se modela en cuatro pasos descritos en los próximos párrafos de este capítulo.

Componente	Prueba													Promedio
	TS 1	TS 2	TS 3	TS 4	TS 5	TS 6	TS 7	TS 8	TS 9	TS 10	TS 11	TS 12	TS 13	
C	63.3	66.2	75.5	50.4	65.9	59.9	64.3	57.9	61	63.3	60.4	55.5	64.8	61.2
H	10.9	16.6	14.9	21.1	3.8	13.9	19.7	16.9	13.9	17.5	12.6	19.2	14.9	15.4
O	3.5	3.2	1.2	16	18.8	9.7	0.6	0.9	7.7	2.7	13.8	11.9	6.1	7.45
N	7.8	0.8	1.6	1.9	0.1	0.8	4	6.8	2.7	1.9	1.8	0.9	0.8	2.92
S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.02
ASH	14.5	13.1	6.8	10.6	11.5	15.8	11.1	17.5	14.7	14.7	11.4	12.6	14.5	13.0

ND No Detectado.

**Tabla 6 Análisis Último (wt% base seca) de RSU de la Ciudad de México.**

**Fuente: Mexico City's Municipal Solid Waste Characteristics. An composition analysis 2012.**

	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	TS7	TS8	TS9	TS10	TS11	TS12	TS13	Promedio
Humedad (%)	49.8	27.5	14.6	39.5	36.4	39.6	36.6	24.8	20.7	36.9	31.8	27.1	30.8	33.7
Orgánicos (%)	41.9	45.1	42.0	48.5	46.6	45.7	62.7	63.8	50.2	35.4	39.9	47.0	41.6	49.5
Peso volumétrico [kg/m <sup>3</sup> ]	145.7	146.1	182.4	152.4	147.7	166.9	232.3	288.0	200.3	160.0	192.9	201.4	145.7	185.9
Contenido energético PCS [MJ/kg]	10.3	11.1	12.2	10.7	10.0	9.7	10.7	11.4	14.0	9.5	11.5	9.7	12.0	10.9

**Tabla 7 Análisis Próximo de RSU de la Ciudad de México.**

**Fuente: Mexico City's Municipal Solid Waste Characteristics an composition analysis 2012.**

## Secado.

En el secado se alimenta al gasificador con el influente (en este caso los RSU de la ciudad de México) al reactor Rstoic y se ingresa uno de los análisis elementales del influente ya que como es un elemento convencional, no existen sus propiedades en el software.

La alimentación se especificó en la sección de calculadora en donde se definió como variable independiente el flujo de RSU seco y como variable dependiente el flujo de agua de los RSU que representa la humedad relativa presente en los RSU.

La ecuación que define la humedad es:

$$M_{dry} = \frac{M_{wet}}{1 - M_{wet}}$$

Donde  $M_{dry}$  es la cantidad de humedad en base seca y  $M_{wet}$  es la cantidad de humedad total del influente.

En este proceso se recomienda que para tener una gasificación eficiente y un mejor poder calorífico los RSU deben de tener máximo un 30% de humedad relativa dado que durante el proceso de gasificación se destina una cantidad de energía para evaporar el agua presente en los RSU para que esta pueda llegar al proceso de pirolisis y así obtener una mejor combustión parcial y una calidad de gases de salida mejores. La humedad es un compuesto que resta energía térmica al sistema, por lo que una cantidad excesiva de humedad relativa puede poner en riesgo que la gasificación no pueda ser autosustentable energéticamente hablando.

Para asegurar que la cantidad de humedad relativa es la correcta se agrega un separador flash el cual simula que esa agua sale del sistema pero en realidad es evaporada pero no es un elemento que se usa en la gasificación y por eso sale del proceso. Cuando el agua de la humedad del combustible es evaporada y se saca del proceso ya que es energía restada al combustible. En la figura siguiente podemos ver el Reactor RStoic donde se lleva a cabo el secado y el separador flash donde el agua evaporada sale del sistema en el software ASPEN plus.

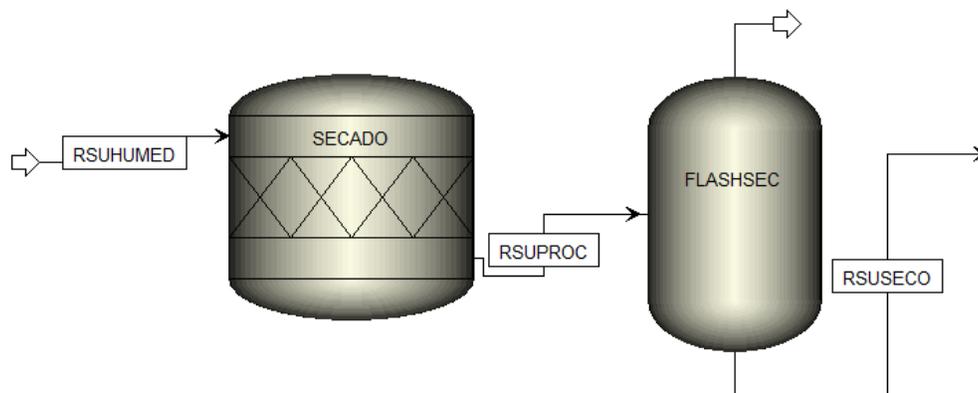


Figura 50. Proceso de Secado en ASPEN plus.

## Descomposición.

Al analizar en ASPEN plus los RSU se tiene que están compuestos por cierta cantidad de elementos convencionales los cuales podemos obtener si descomponemos nuestro influente. Al analizar los RSU se separan en componentes estables como lo son el Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Sulfuro y Cenizas. Como se vio anteriormente la pirolisis separa en Gases ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ , S), Sólidos (Char) y líquidos (Tar), pero nosotros el Char lo aproximamos a carbón puro sólido, esta aproximación es posible ya que el Char de los RSU se compone de un 80% a 90% de carbón puro (6). El análisis de los alquitranes se desprecia ya que los alquitranes se forman a bajas temperaturas, se forman en una cantidad pequeña en los gasificadores tipo downdraft que es el utilizado en este trabajo, además de que no son parte de este estudio ya que se enfoca en la producción de hidrógeno, aun así, estos se pueden reformar con vapor de agua y al final quedan productos similares como lo son el hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano.

En ASPEN plus para poder hacer esta conversión de elementos no convencionales a convencionales se usa un reactor llamado Ryield el cual con una calculadora basada en el análisis último y la humedad del análisis próximo, se calcula la cantidad de elementos convencionales.

En el proceso se necesita una cantidad de calor para poder descomponer los RSU y para compensar la cantidad de calor a la entrada y a la salida del reactor se conecta este al reactor de Gibbs donde se llevan a cabo las reacciones de Gasificación.

En la figura siguiente (figura 40) podemos ver el reactor que se utilizó en ASPEN plus.

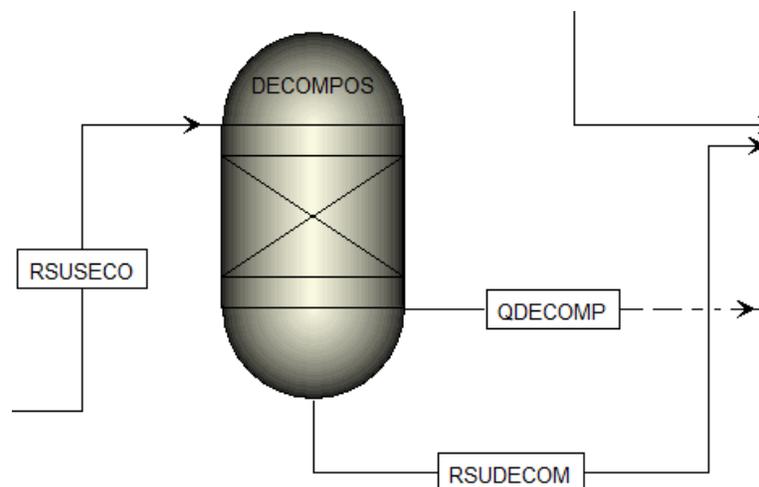


Figura 49. Reactor Ryield en ASPEN plus.

## Combustión parcial y Gasificación.

La combustión parcial se lleva a cabo con elementos convencionales como el carbono y el hidrógeno, como en el reactor Ryield calculamos la cantidad de elementos convencionales que contienen los RSU en esta operación unitaria llamada Gasificación se lleva a cabo en un reactor de Gibbs. El reactor de Gibbs se usa cuando las reacciones son instantáneas y los fenómenos son posibles de ocurrir en la naturaleza. El reactor de Gibbs llega al equilibrio químico a través del cálculo de la energía mínima libre de Gibbs como se explicó en capítulo anterior. En este reactor se llevan a cabo las reacciones de combustión del carbón, combustión del hidrógeno, la reacción de metanización, combustión parcial de monóxido de carbono, reformación del metano con vapor, la reacción Shift y las reacciones de carbón como la Boudouard y las reacciones de formación de amoníaco y de ácido sulfhídrico.

En el presente trabajo se utilizaron las reacciones mostradas a continuación en la tabla 8:

Reacciones de Gasificación		
Reacción	Nombre de la Reacción	Numero de Reacción
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Combustión de carbón	R-1
$H_2 + 0.5 O_2 \rightarrow H_2O$	Combustión de hidrógeno	R-2
$C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$	Agua gas	R-3
$CO_2 + C \rightarrow 2CO$	Boudouard	R-4
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	CO shift	R-5
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	Metanización	R-6
$CO + 0.5 O_2 \rightarrow 2 CO_2$	Combustión parcial del CO	R-7
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	Reformación del metano con Vapor	R-8
$0.5 N_2 + 1.5 H_2 \rightarrow NH_3$	Formación de $NH_3$	R-9
$H_2 + S \rightarrow H_2S$	Formación de $H_2S$	R-10

Tabla 8 Reacciones de gasificación utilizadas en el software ASPEN plus.

Fuente: The effect of air preheating in a biomass CFB gasifier using ASPEN plus simulation 2009.

En la figura 41 podemos ver el reactor de Gibbs utilizado en ASPEN plus en el cual se llevan a cabo las reacciones antes mostradas.

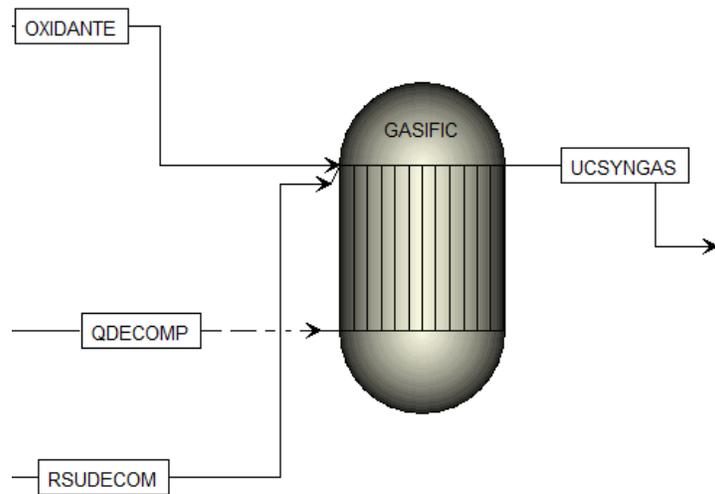


Figura 51. Reactor de Gasificación en ASPEN plus.

### Separación de gases.

La separación de sólidos y gases es muy importante ya que los gases que obtenemos de la gasificación son utilizables, si estos gases los dejáramos con ceniza nuestros resultados son correctos pero para poder aumentar el poder calorífico de los gases. En ASPEN plus limpiamos estos gases con un separador de flujo. La separación solo se hace de la parte de ceniza ya que en el gasificador solo se puede sacar la ceniza que sale del proceso sin limpiar el gas de síntesis.

En la figura 42 podemos ver el bloque el cual se utilizó en ASPEN plus para separar los sólidos de los gases.

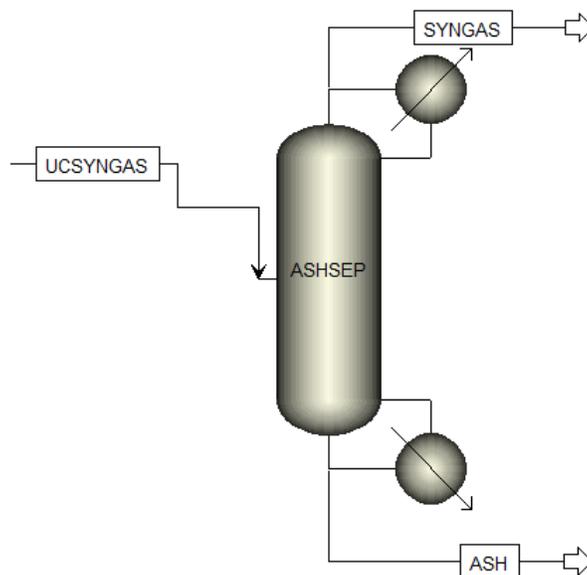


Figura 52. Separador de Ceniza en ASPEN plus.

## Descripción del modelo.

### Suposiciones del modelo.

Las suposiciones básicas en el modelo son:

1. Estado estacionario y libre de cinética de reacción.
2. Sistema Isotérmico.
3. Todo el sulfuro reacciona a  $H_2S$ . (7).
4. Solo  $NH_3$  se forma, no se producen óxidos de nitrógeno. (7).
5. Los alquitranes y otros productos pesados se asumen como productos que no están en equilibrio para reducir la complejidad hidrodinámica. (7).

### Método de Propiedades físicas.

El método utilizado para definir todas las propiedades físicas de los componentes convencionales en el proceso de gasificación es el método de Peng Robinson Boston Mathias función alpha (PR-BM). El parámetro alpha en este paquete de propiedades es una variable dependiente de la temperatura. Este parámetro mejora la correlación de los componentes puros presión vapor cuando la temperatura es muy alta. Esto es porque este paquete de propiedades es adecuado para el proceso de gasificación donde la temperatura es bastante alta. Los modelos de entalpía y densidad seleccionados para los RSU y la Ceniza que son componentes no convencionales son HCOALGEN y DCOALGIT (6).

## Validación del modelo.

El modelo de simulación fue validado usando otras simulaciones [ (7), (8)] y con datos experimentales de la gasificación (10). Se puede observar que el modelo está en buen funcionamiento ya que los resultados obtenidos se acercan a los resultados publicados por otros autores.

En la tabla siguiente podemos observar los datos experimentales así como los resultados obtenidos en simulaciones publicadas [ (10), (7), (8)]. Los resultados obtenidos son concentraciones molares en base seca del gas de síntesis.

	S. Naaved Experimental	S. Naaved Simulación	Sharmina Begum Simulación	Presente estudio Simulación
N <sub>2</sub>	67.34	68.67	62.38	71.08
O <sub>2</sub>	1.2	1.09	0	0.0006
CO	14.89	14.74	18.5	14.1
CO <sub>2</sub>	8.4	7.86	7.75	10.22
H <sub>2</sub>	4.58	5.19	5.2	4.58
CH <sub>4</sub>	1.54	0.39	1.32	0

Tabla 9 Valores de simulaciones de artículos de investigación y el presente estudio.

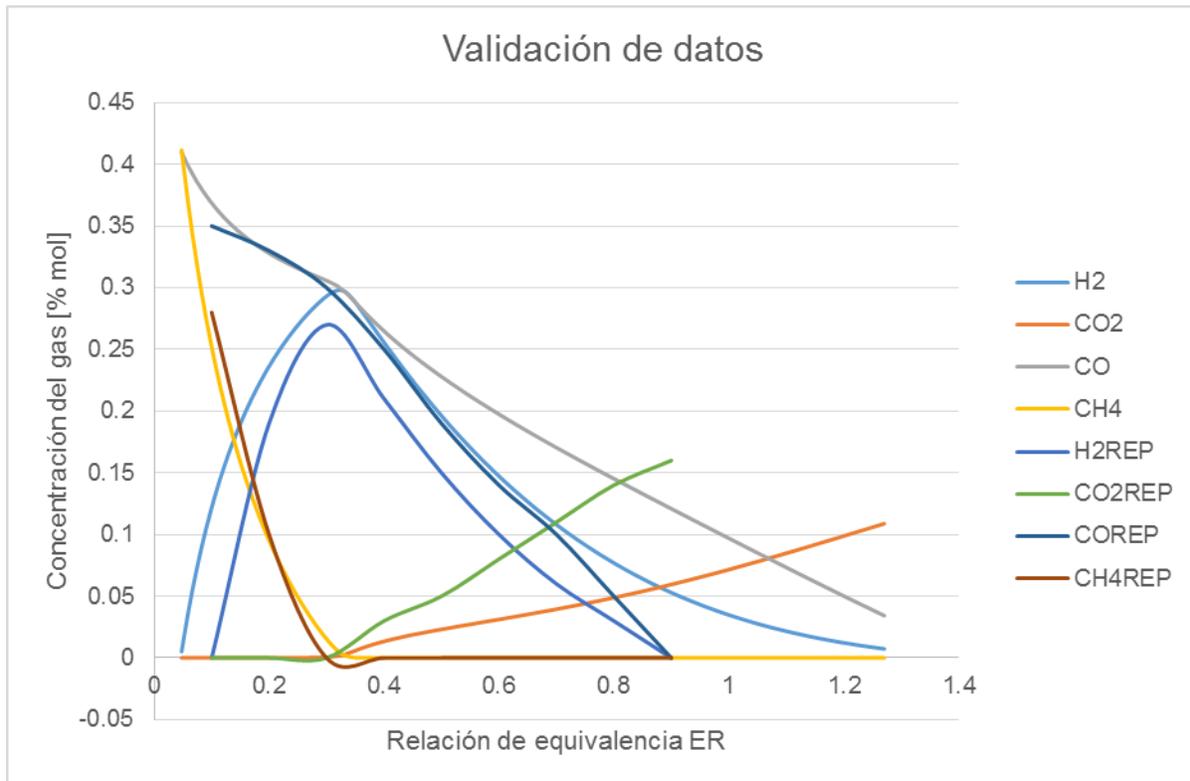
	Diferencia Naveed Experimental vs presente estudio	Diferencia Naaved Simulación vs presente estudio	Diferencia S. Begum Simulación vs presente estudio	Diferencia Naaved Experimental vs Naaved simulación	Diferencia Naaved Experimental vs S. Begum simulación
N <sub>2</sub>	-3.74	-2.41	-8.7	-1.33	4.96
O <sub>2</sub>	1.1994	1.0894	-0.0006	0.11	1.2
CO	0.79	0.64	4.4	0.15	-3.61
CO <sub>2</sub>	-1.82	-2.36	-2.47	0.54	0.65
H <sub>2</sub>	0	0.61	0.62	-0.61	-0.62
CH <sub>4</sub>	1.54	0.39	1.32	1.15	0.22

Tabla 10. Diferencias de los valores obtenidos de las simulaciones de otros estudios con el presente trabajo.

Al analizar las diferencias entre nuestro estudio con los datos experimentales y los datos de otra simulación numérica podemos ver que se tiene un buen acercamiento con excepción del metano, el metano presenta una cantidad mínima en todas las simulaciones ya que generalmente los gasificadores generan Alquitranses (TAR) y este compuesto no se considera en las simulaciones libres de cinética de reacción, al tener esto la cantidad real de metano se ve disminuida ya que ASPEN plus a cierta temperatura el metano tiene un decaimiento rápido (6). La cantidad de Metano se podría calcular pero nuestro modelo es libre de cinética y también la cantidad de metano solo varia en un 1.5% lo cual no modificaría mucho nuestro poder calorífico por lo cual la cantidad de Metano no es calculada. También se puede ver diferencia en el dióxido de carbono, este compuesto muestra que se

la diferencia obtenida es alta a comparación de los demás compuestos, esto posiblemente se debe a que el metano se reforma con la reacción de reformación de metano y parte se convierte en monóxido de carbono y también hidrógeno.

En la siguiente grafica podemos ver la comparación de nuestra simulación contra la simulación de Naveed Ramzan (7) de la cual obtuvimos de un análisis de sensibilidad.



**Gráfica 1. Análisis de sensibilidad de la gasificación comparado.**

En el análisis de sensibilidad se muestra nuestra simulación contra la simulación de Naaved (7), los valores reportados de la composición del gas de síntesis son los que en la gráfica aparecen con la leyenda REP, esta leyenda nos dice que son los valores reportados en la simulación de Naaved. En el análisis de sensibilidad podemos observar que se tiene un comportamiento similar mas no el mismo, al mirar detenidamente la gráfica se puede ver que en un inicio nosotros tenemos una cantidad mayor de metano que se va reformando esto debido a que las reacciones con las que se realizó la simulación, la diferencia en la cantidad de hidrógeno proviene de la cantidad de metano que se tiene, agregándole la diferencia entre la cantidad de monóxido de carbono y dióxido de carbono que también provienen de la cantidad de metano extra y finalmente la cantidad de monóxido de carbono interviene sumándose a la cantidad de dióxido de carbono ya que el monóxido de carbono se combustiona. En nuestro modelo podemos ver que a diferencia del modelo de Naveed (7), el valor obtenido de la relación de

equivalencia se acerca al valor reportado en literatura de la relación de equivalencia (6) en su punto máximo de producción de hidrogeno que es un valor en los intervalos de 0.32 y 0.35, y en la simulación de Naveed el valor que obtiene es de 0.3 de la relación de equivalencia. Otras diferencias importantes encontradas y que son importantes destacar es la cantidad de monóxido de carbono que en la simulación de Naveed desaparece a una relación de equivalencia de 0.9 y en nuestra simulación desaparece a una cantidad mayor de 1.2 lo que nos indica que es una simulación acorde a la naturaleza ya que para desaparecer la cantidad de monóxido se necesita un exceso de aire para poder desaparecerlo por completo y por eso la diferencia en la cantidad de monóxido y de dióxido de carbono.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS.**

En este capítulo se analizan resultados mediante graficas de los parámetros más importantes en la gasificación. Es preciso saber que el presente modelo es un modelo libre de cinética con el cual se realizó un análisis de sensibilidad para obtener parámetros como el balance de masa y energía, la temperatura de salida de los gases del gasificador, la composición molar de los gases productos de la gasificación, el efecto de la razón de equivalencia o ER (“Equivalence Ratio” por sus siglas en ingles), en el caso del vapor se analiza la relación de oxidante combustible, el poder calorífico y la composición molar de los gases productos de la gasificación, se comparó la producción de hidrógeno que se da con los distintos tipos de oxidantes y por último el valor de la eficiencia de gas frio o CGE (“Cold Gas Efficiency” por sus siglas en inglés).

### **Balance de energía.**

La importancia del balance de masa y energía es para saber si nuestras simulaciones aparte de estar validadas están funcionando correctamente, el programa ASPEN plus nos proporciona valores con los cuales podemos verificar el balance de masa y energía.

En las tablas y gráficas siguientes podemos ver los balances de energía de cada uno de los bloques que conforman el proceso de gasificación con cada uno de sus oxidantes correspondientes. Las tablas muestran la cantidad del flujo en masa y energía que entra, la cantidad de flujo que sale de cada proceso calculados por el software ASPEN plus. Los resultados presentados de balance de energía de cada uno de los procesos se dividen en: Secado, Flasheo, Descomposición, Gasificación, Separación de sólido y gas. En cada tabla se muestra la corriente que entra y sale (líneas de corriente o streams llamadas así en inglés), el balance total de masa y energía y la diferencia entre la entrada y salida (diferencia). Todos los balances de energía presentados son calculados en el punto donde es mayor la producción de hidrógeno.

### **Balance de energía de la gasificación con Oxígeno.**

En la tabla siguiente podemos ver los balances de masa y energía de cada uno de los procesos en los que dividimos la gasificación, el balance muestra la gasificación con oxígeno como oxidante, en cada uno de los procesos podemos ver que las diferencias son cero, en los procesos que se tiene un extra como calor es porque se calcula una carga térmica la cual complementa los balances, esta carga térmica es necesaria calcularla ya que es la energía que se requiere para que ocurran las reacciones en el caso del reactor de secado, en el caso del reactor de descomposición se calcula una carga térmica asociada a la descomposición de los elementos no convencionales a convencionales y así tener un balance de energía completo.

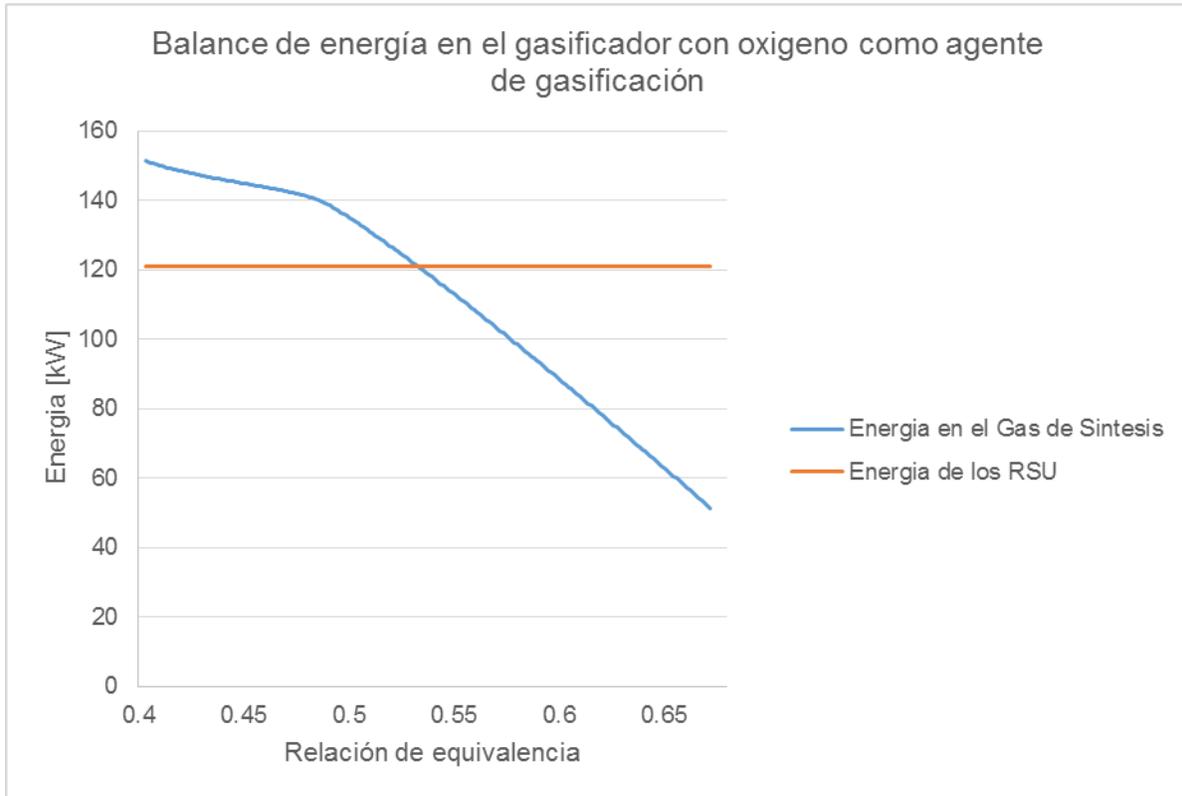
En la tabla 11 vemos como se pierde masa en el flasheo, esta masa que se pierde es masa de agua que debe ser evaporada del combustible debido a su humedad, para esto se calcula la cantidad de energía o calor como se refleja en la tabla que se necesita para poder quitar esa agua. En el balance de energía es más claro como la energía que tenemos en el sólido la podemos convertir en energía de gas y aprovecharla. La energía que entra al gasificador como RSU es de -237.50 [kW] y salen -197.33 [kW] aprovechables como gas de síntesis o Syngas.

<b>GASIFICACION CON OXIGENO</b>						
<b>Balance de masa y energía</b>						
<b>Proceso</b>	<b>Masa [kg/h]</b>			<b>Energía [kW]</b>		
	entra	sale	diferencia	entra	sale	diferencia
<b>Secado</b>	RSU humedo	RSU proc		RSU humedo	RSU proc	
	40	39.99999	1E-05	-237.5055	-227.0034	-4.11E-05
				calor	10.5020589	
<b>Flasheo</b>	RSU proc	GAS exha y RSU seco		RSU proc	GAS exha y RSU seco	
	39.99999	8.134772	-2E-06	-227.0034	-29.67451	1E-05
		31.86522			-197.3289	
<b>Descomposición</b>	RSU seco	RSU descompuesto		RSU seco	RSU descompuesto	
	31.86522	31.86522	0	-197.3289	3.810964	-3E-05
				calor	201.139834	
<b>Gasificación</b>	RSU descompuesto y Oxidante	Syngas sin limpiar		RSU descompuesto y Oxidante	Syngas sin limpiar	
	31.86522	85.60894	0	3.810964	-197.3345	1.44E-05
	53.74372			-0.0056156		
				201.139834	calor	
<b>Separador de ceniza</b>	Syngas sin limpiar	Syngas y ceniza		Syngas sin limpiar	Syngas y ceniza	
	85.60894	81.86924	-3E-06	-197.3345	-196.7482	3.06E-05
		3.739703			-0.5863306	

**Tabla 11 Balance de energía de la gasificación con oxígeno como agente de gasificación.**

En la gráfica 2 podemos observar del análisis de sensibilidad un balance de energía, la comparación de la energía que contienen los RSU y la energía en el gas de síntesis obtenida en la gasificación con oxígeno como agente de gasificación, Podemos observar que mientras hay un aumento de la relación de equivalencia tenemos una disminución de la energía contenida en el gas de síntesis, así mismo, podemos observar que hay un punto de cruce donde la energía contenida en el gas de síntesis es

menor que la energía de los RSU, en ese punto es donde la gasificación deja de ser atractiva ya que se pierde energía y no sirve de nada el proceso.



Gráfica 2 Balance de energía en el gasificador con oxígeno como agente de gasificación.

### Balance de energía de la gasificación con Aire.

En la tabla siguiente podemos ver los balances de masa y energía de cada uno de los procesos en los que dividimos la gasificación, el balance muestra la gasificación con aire atmosférico como oxidante, en cada uno de los procesos podemos ver que las diferencias son cero, en los procesos que se tiene un extra como calor es porque se calcula una carga térmica la cual complementa los balances, esta carga térmica es necesaria calcularla ya que es la energía que se requiere para que ocurran las reacciones en el caso del reactor de secado, en el caso del reactor de descomposición se calcula una carga térmica asociada a la descomposición de los elementos no convencionales a convencionales y así tener un balance de energía completo.

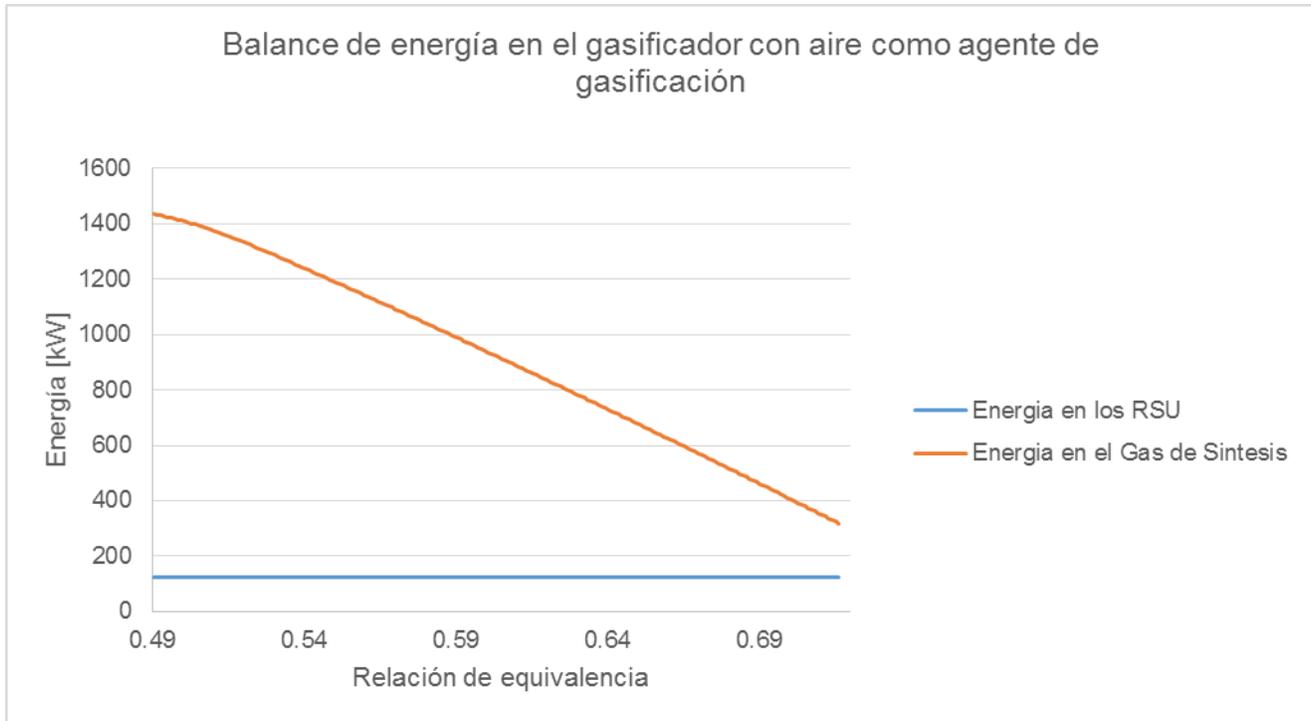
En la tabla 12 vemos como se pierde masa en el flasheo, esta masa que se pierde es masa de agua que debe ser evaporada del combustible debido a su humedad, para esto se calcula la cantidad de energía o calor como se refleja en la tabla que se necesita para poder quitar esa agua. En el balance de energía es más claro como la energía que tenemos en el sólido la podemos convertir en energía de gas y aprovecharla. A diferencia del balance de energía con agente gasificante al oxígeno, se puede

ver que se inyecta mayor cantidad de masa al gasificador para poder obtener la misma energía al final, en la gasificación con oxígeno puro se inyectan 53.34 [kg/h] y en la gasificación con aire se inyectan 239.34 [kg/h].

GASIFICACION CON AIRE						
Balance de masa y energía						
Proceso	Masa [kg/h]			Energía [kW]		
	entra	sale	diferencia	entra	sale	diferencia
Secado	RSU humedo	RSU proc		RSU humedo	RSU proc	
	40	39.99999	1E-05	-237.5055	-227.0034	-4.11E-05
				calor	10.5020589	
Flasheo	RSU proc	GAS exha y RSU seco		RSU proc	GAS exha y RSU seco	
	39.99999	8.134772	-2E-06	-227.0034	-29.67451	1E-05
		31.86522			-197.3289	
Descomposición	RSU seco	RSU descompuesto		RSU seco	RSU descompuesto	
	31.86522	31.86522	0	-197.3289	3.810964	-3E-05
				calor	201.139834	
Gasificación	RSU descompuesto y Oxidante	Syngas sin limpiar		RSU descompuesto y Oxidante	Syngas sin limpiar	
	239.3417	271.2069	2E-05	-0.0247961	-197.3533	-
	31.86522			3.810964		0.0003661
				201.139834	calor	
Separador de ceniza	Syngas sin limpiar	Syngas y ceniza		Syngas sin limpiar	Syngas y ceniza	
	271.2069	267.4672	-3E-06	-197.3533	-196.7035	4.22E-05
		3.739703			-0.6498422	

Tabla 12 Balance de energía de la gasificación con aire como agente de gasificación.

En la gráfica 3 podemos observar del análisis de sensibilidad un balance de energía, la comparación de la energía que contienen los RSU y la energía en el gas de síntesis obtenida en la gasificación con aire como agente de gasificación, Podemos observar que mientras hay un aumento de la relación de equivalencia tenemos una disminución de la energía contenida en el gas de síntesis, así mismo, podemos observar que mientras mayor cantidad de aire le inyectemos el gas de síntesis se va acercando al valor energético del gas de síntesis y pasaría lo mismo que en el caso de la gasificación con oxígeno como agente de gasificación (esta dejaría de ser atractiva ya que no se aumenta la energía contenida en el gas de síntesis).



**Gráfica 3 Balance de energía en el gasificador con aire como agente de gasificación.**

### **Balance de energía de la gasificación con vapor de agua.**

En la tabla siguiente podemos ver los balances de masa y energía de cada uno de los procesos en los que dividimos la gasificación, el balance muestra la gasificación con vapor de agua como oxidante, en cada uno de los procesos podemos ver que las diferencias son cero, en los procesos que se tiene un extra como calor es porque se calcula una carga térmica la cual complementa los balances, esta carga térmica es necesaria calcularla ya que es la energía que se requiere para que ocurran las reacciones en el caso del reactor de secado, en el caso del reactor de descomposición se calcula una carga térmica asociada a la descomposición de los elementos no convencionales a convencionales y así tener un balance de energía completo.

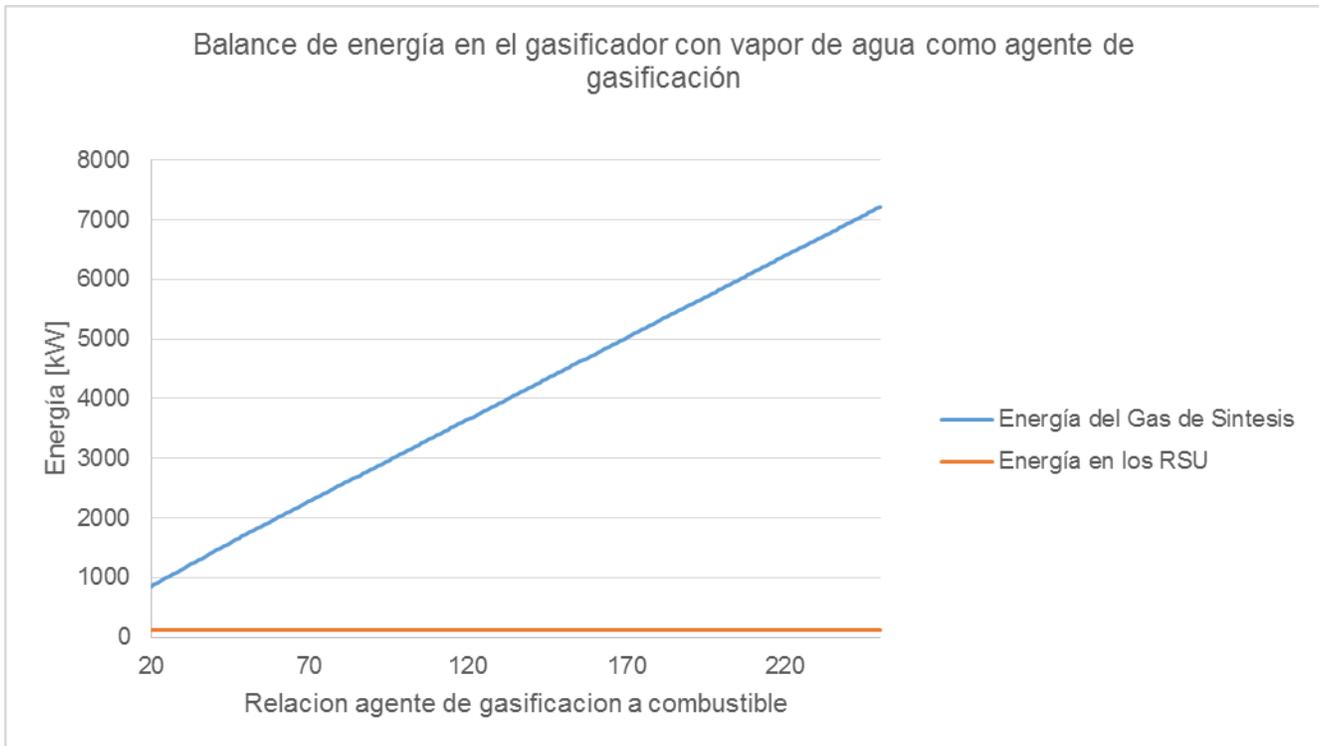
En la tabla 13 vemos como se pierde masa en el flasheo, esta masa que se pierde es masa de agua que debe ser evaporada del combustible debido a su humedad, para esto se calcula la cantidad de energía o calor como se refleja en la tabla que se necesita para poder quitar esa agua. En el balance de energía es más claro como la energía que tenemos en el sólido la podemos convertir en energía de gas y aprovecharla. A diferencia del balance de energía con agente gasificante al oxígeno y el aire, se puede ver que se inyecta mayor cantidad de masa al gasificador para poder obtener mayor energía al final, en la gasificación con oxígeno puro se inyectan 53.34 [kg/h], en la gasificación con aire se

inyectan 239.34 [kg/h] y en la gasificación con vapor de agua se inyectan 2048.24 [kg/h] de vapor de agua y se obtiene un gas con una energía total de -7626.09 [kW].

<b>GASIFICACION CON VAPOR DE AGUA</b>						
<b>Balance de masa y energía</b>						
Proceso	Masa [kg/h]			Energía [kW]		
	entra	sale	diferencia	entra	sale	diferencia
<b>Secado</b>	RSU humedo	RSU proc		RSU humedo	RSU proc	
	40	39.99999	1E-05	-237.5055	-227.0034	-4.11E-05
				calor	10.5020589	
<b>Flasheo</b>	RSU proc	GAS exha y RSU seco		RSU proc	GAS exha y RSU seco	
	39.99999	8.134772	-2E-06	-227.0034	-29.67446	-4E-05
		31.86522			-197.3289	
<b>Descomposición</b>	RSU seco	RSU descompuesto		RSU seco	RSU descompuesto	
	31.86522	31.86522	0	-197.3289	3.810964	2.2E-05
				calor	201.139886	
<b>Gasificación</b>	RSU descompuesto y Oxidante	Syngas sin limpiar		RSU descompuesto y Oxidante	Syngas sin limpiar	
	31.86522	2080.106	0.00022	3.810964	-7626.097	7.8E-05
	2048.241			-7428.768		
				201.139886	calor	
<b>Separador de ceniza</b>	Syngas sin limpiar	Syngas y ceniza		Syngas sin limpiar	Syngas y ceniza	
	2080.106	2076.367	0.000703	-7626.097	-7625.318	0.0001098
		3.739703			-0.7788902	

**Tabla 13 Balance de energía de la gasificación con vapor de agua como agente de gasificación.**

En la gráfica 4 podemos observar del análisis de sensibilidad un balance de energía, la comparación de la energía que contienen los RSU y la energía en el gas de síntesis obtenida en la gasificación con aire como agente de gasificación, Podemos observar que mientras hay un aumento de la relación agente de gasificación a combustible tenemos un aumento de la energía contenida en el gas de síntesis, así mismo, podemos observar que mientras mayor cantidad de vapor de agua le inyectemos el gas de síntesis se va alejando del valor energético del gas de síntesis y pasaría al contrario que en los casos de la gasificación con oxígeno y aire como agentes de gasificación ya que la energía aumenta en el gas de síntesis (Syngas).



Gráfica 4 Balance de energía en el gasificador con vapor de agua como agente de gasificación.

### Análisis de la temperatura de los gases.

La temperatura analizada en cada caso varía ya que depende del oxidante usado. Los valores obtenidos están en unidades absolutas Kelvin y la concentración del gas es molar ya que así vemos que porcentaje del total tenemos en la mezcla con cada compuesto en los resultados. La composición del gas presentado en todos los resultados es en base húmeda, ya que así es como se obtiene el gas de síntesis (Syngas) del gasificador.

### Análisis de la temperatura de los gases de la gasificación con oxígeno.

En la gráfica 5 podemos observar los datos obtenidos del análisis de sensibilidad. La temperatura está dada en grados Kelvin y varía entre 569 y 2370 K. Como puntos importante tenemos donde se tiene la mayor producción de hidrógeno ( $H_2$ ) el punto se encuentra en los 582.57 K y nos da un valor máximo de 0.2946. En el comportamiento del CO se tiene un máximo de magnitud de 0.16036 con una temperatura en la gasificación de 1162.66 K, este compuesto se puede ver cómo va decreciendo cuando el  $CO_2$  va aumentando, esto debido a la reacción de combustión del CO. Para el metano  $CH_4$  podemos ver que desaparece alrededor de los 720 K pero como habíamos explicado este es un modelo libre de cinética, en la realidad se tiene una cantidad mayor de metano pero este desaparece

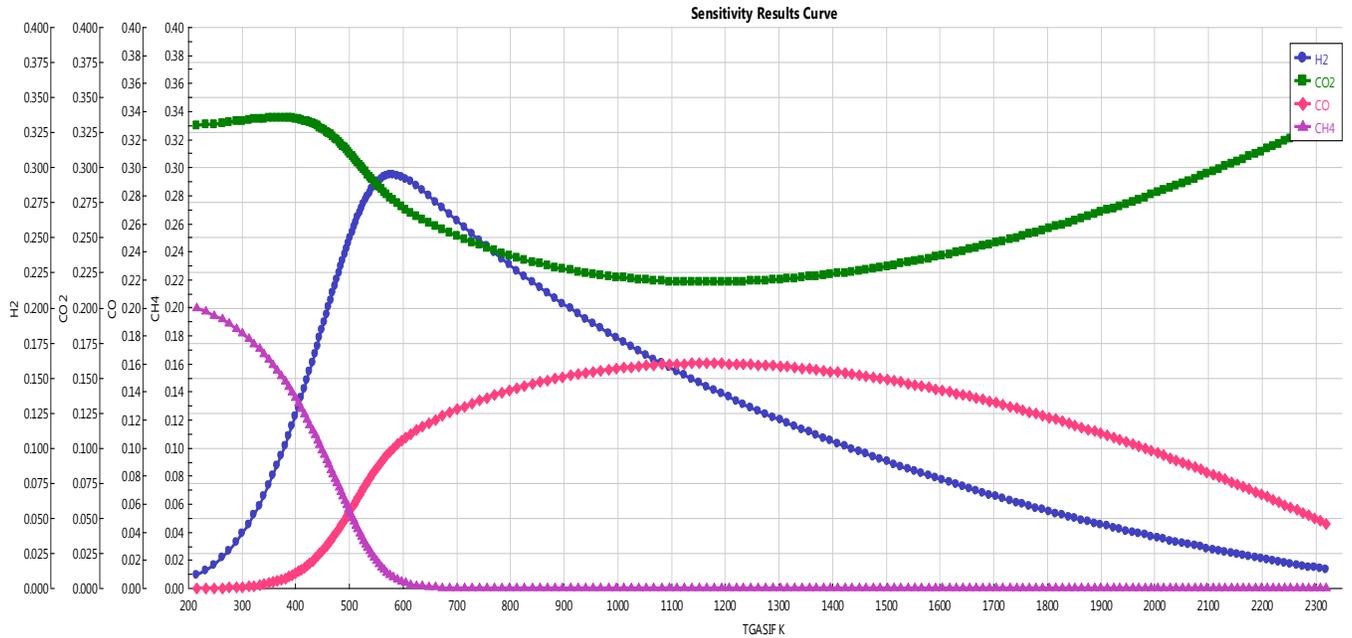
en cualquier simulación por las propiedades que maneja ASPEN plus, esta cantidad de metano CH<sub>4</sub> es despreciable ya que la variación es hasta de un 1.5% como se explicó en la validación de datos.

### **Análisis de la temperatura de los gases de la gasificación con aire.**

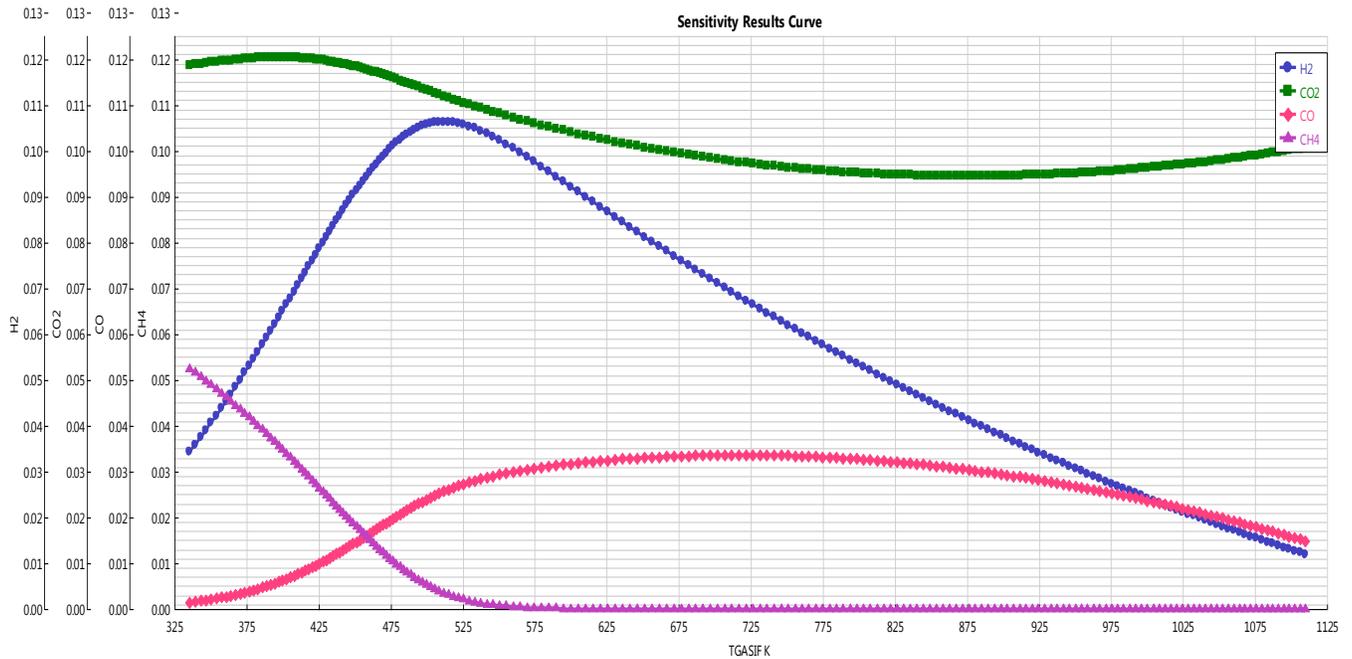
En la gráfica 6 podemos observar los datos obtenidos del análisis de sensibilidad de temperatura. La temperatura está dada en grados Kelvin K y varía de 465 a 1244 K. Como puntos importantes tenemos donde se tiene la mayor producción de hidrógeno (H<sub>2</sub>) el punto se encuentra en los 512.63 K reportando un valor de 0.1063 en fracción molar. En el comportamiento del CO se tiene un máximo que se reporta con un valor de 0.0336 y una temperatura de gasificación de 712.5 K. Para el metano CH<sub>4</sub> podemos ver que desaparece alrededor de los 600 K. En cuanto al comportamiento del CO<sub>2</sub> vemos que disminuye debido a la reacción Boudouard que explica que cuando se llega al punto donde el dióxido de carbono ya no puede actuar con más carbón sólido se comienza con la combustión del mismo y por eso disminuye en la composición general del gas.

### **Análisis de la temperatura de los gases de la gasificación con vapor de agua.**

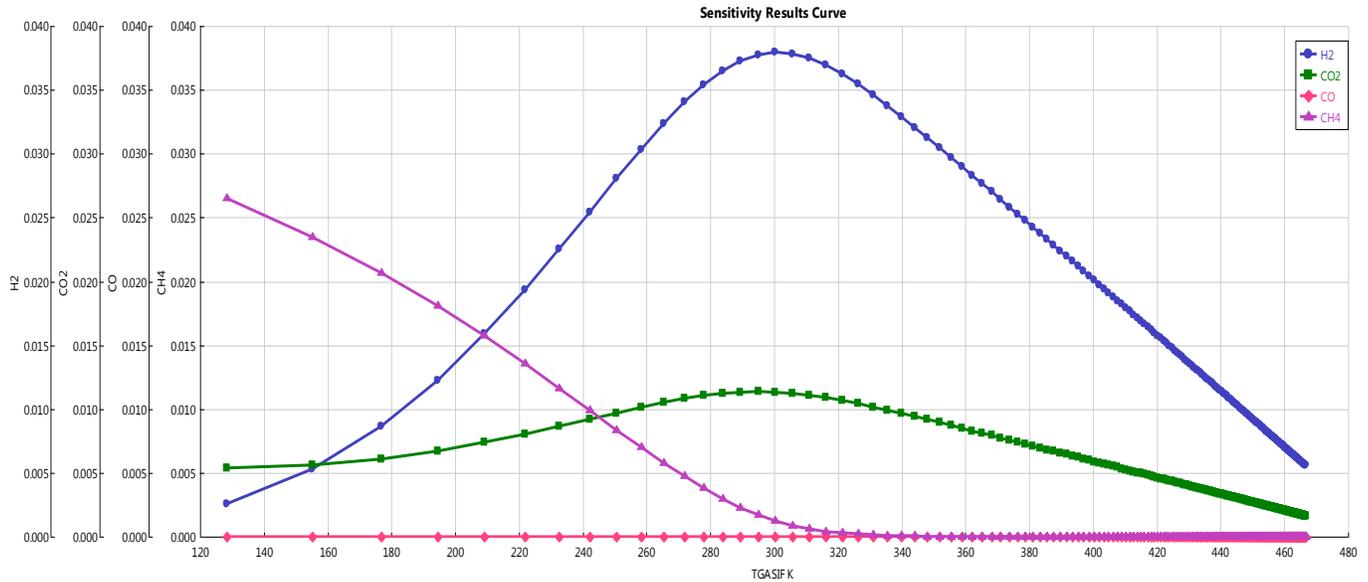
En la gráfica 7 podemos observar los datos obtenidos en el análisis de sensibilidad de cantidad de flujo de vapor. La temperatura está dada en grados Kelvin y varía entre 128 y 466 K. Como puntos importantes tenemos donde se tiene la mayor producción de hidrógeno (H<sub>2</sub>) el punto se encuentra en los 300.32 K y nos da un valor máximo de 0.0379, el comportamiento del dióxido de carbono va de acuerdo a la reacción Boudouard. El comportamiento del monóxido de carbono se tiene un máximo antes de que se llegue a la combustión con un valor aproximado al cero ya que dada la reacción shift el monóxido de carbono reacciona con el agua y se produce hidrógeno y dióxido de carbono, todo esto ocurriendo a una temperatura de 335 K. Para el metano podemos ver que desaparece alrededor de los 335 K. Al observar el comportamiento del dióxido de carbono en la gráfica como si este compuesto se redujera pero lo que pasa con él es que no tiene un comportamiento de crecimiento ya que no es estable a las temperaturas a las que está ocurriendo la gasificación. El dióxido de carbono no es tan importante en este estudio ya que lo que se busca obtener es un gas con un poder calorífico alto y este gas no contribuye a nuestro objeto aunque es un parámetro que nos dice la cantidad de contaminantes que se emiten a la atmósfera debe ser un gas objeto del presente estudio.



**Gráfica 5** Temperatura del gasificador vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante al oxígeno puro.



**Gráfica 6** Temperatura del gasificador vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante al aire atmosférico.



**Gráfica 7 Temperatura del gasificador vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante vapor de agua.**

### **Análisis de la relación de equivalencia (ER Equivalence Ratio).**

La relación de equivalencia (ER Equivalence Ratio) es un parámetro adimensional y como vimos en el capítulo anterior es una relación entre la cantidad estequiometría necesaria de aire para la combustión y la cantidad de aire que realmente se está usando en la gasificación. Como nuestro análisis de sensibilidad se hace variando la cantidad de aire suministrado la razón de equivalencia es uno de los parámetros más importantes de analizar en la gasificación.

### **Análisis de la relación de equivalencia de la gasificación con oxígeno.**

En la gráfica 8 podemos observar los datos obtenidos del análisis de sensibilidad. La relación de equivalencia (Equivalence Ratio ER) varía entre 0.47 y 0.68. Como puntos importante tenemos donde se tiene la mayor producción de hidrógeno (H<sub>2</sub>) con una magnitud la razón de equivalencia de 0.4824, con un valor de producción de hidrógeno de 0.2946. El comportamiento del CO se tiene un máximo con un valor de producción de monóxido de carbono de 0.1603 y un valor de ER de 0.5455. La descripción de la gráfica del monóxido de carbono al igual que la del hidrógeno se puede explicar con la reacción shift, la reacción de combustión del monóxido de carbono ya que este parámetro alcanza un punto máximo y al no tener más cantidad agua para reaccionar con el monóxido de carbono

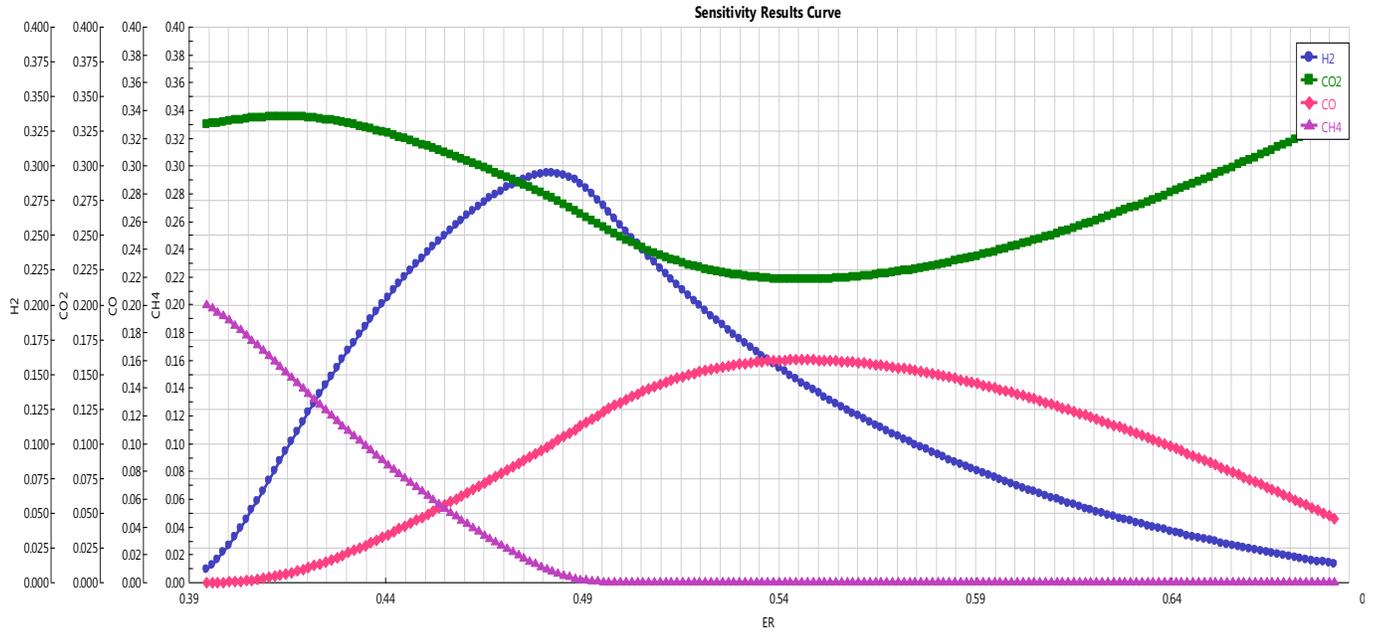
entonces es cuando el monóxido de carbono comienza a entrar en combustión. Para el metano podemos ver que desaparece alrededor del valor de 0.5002 de la relación de equivalencia (ER).

### **Análisis de la relación de equivalencia de la gasificación con aire.**

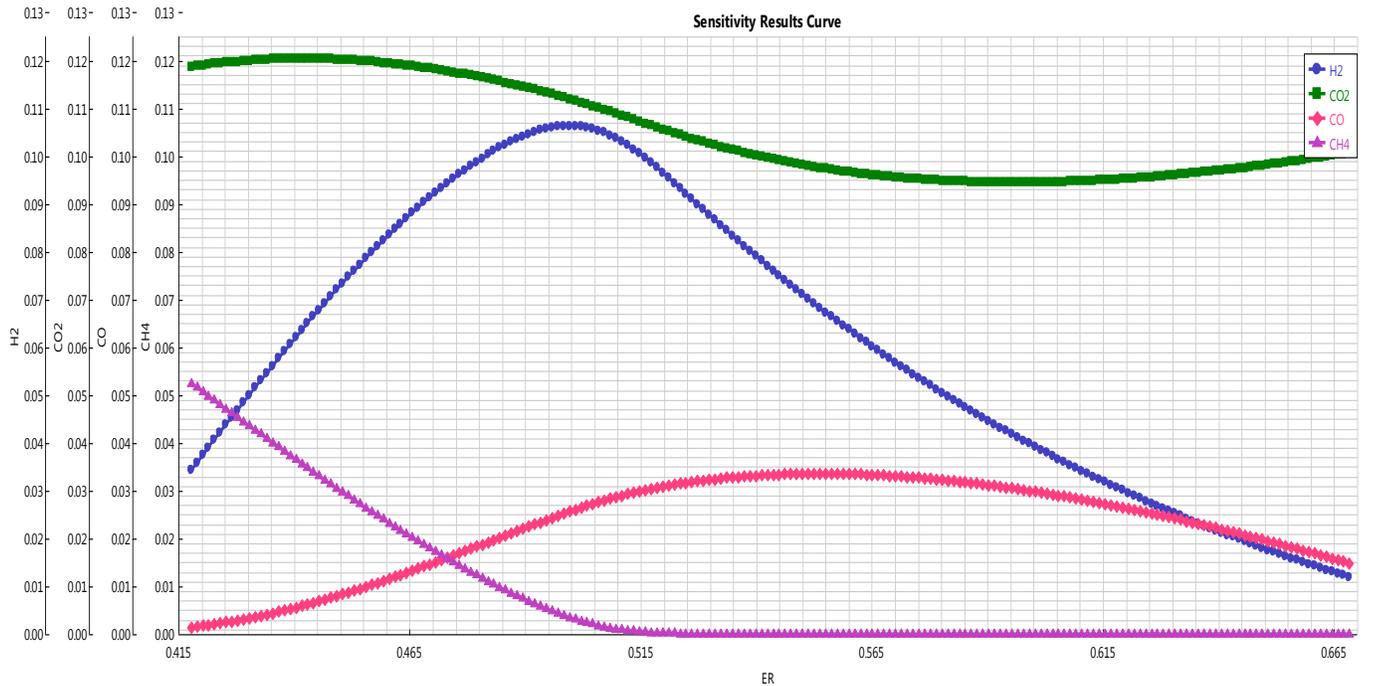
En la gráfica 6 podemos observar los datos obtenidos del análisis de sensibilidad. La relación de equivalencia (Equivalence Ratio ER) varía entre 0.47 y 0.71. Como puntos importantes tenemos donde se tiene la mayor producción de hidrógeno ( $H_2$ ) encontrándose en 0.4999 con valor de la razón de equivalencia ER y como valor de producción de hidrógeno un valor de 0.1063, el comportamiento del  $CO_2$  va de acuerdo a la reacción de combustión y la reacción shift que hace que disminuya su cantidad. En el comportamiento del CO se tiene un máximo con un valor de 0.0336 en la producción de CO y un valor de la razón de equivalencia ER de 0.5526. Para el metano podemos ver que desaparece alrededor del valor 0.5251 de la relación de equivalencia ER y su comportamiento se debe en su mayoría a la reacción de reformación del mismo.

### **Análisis de la relación de equivalencia de la gasificación con vapor de agua.**

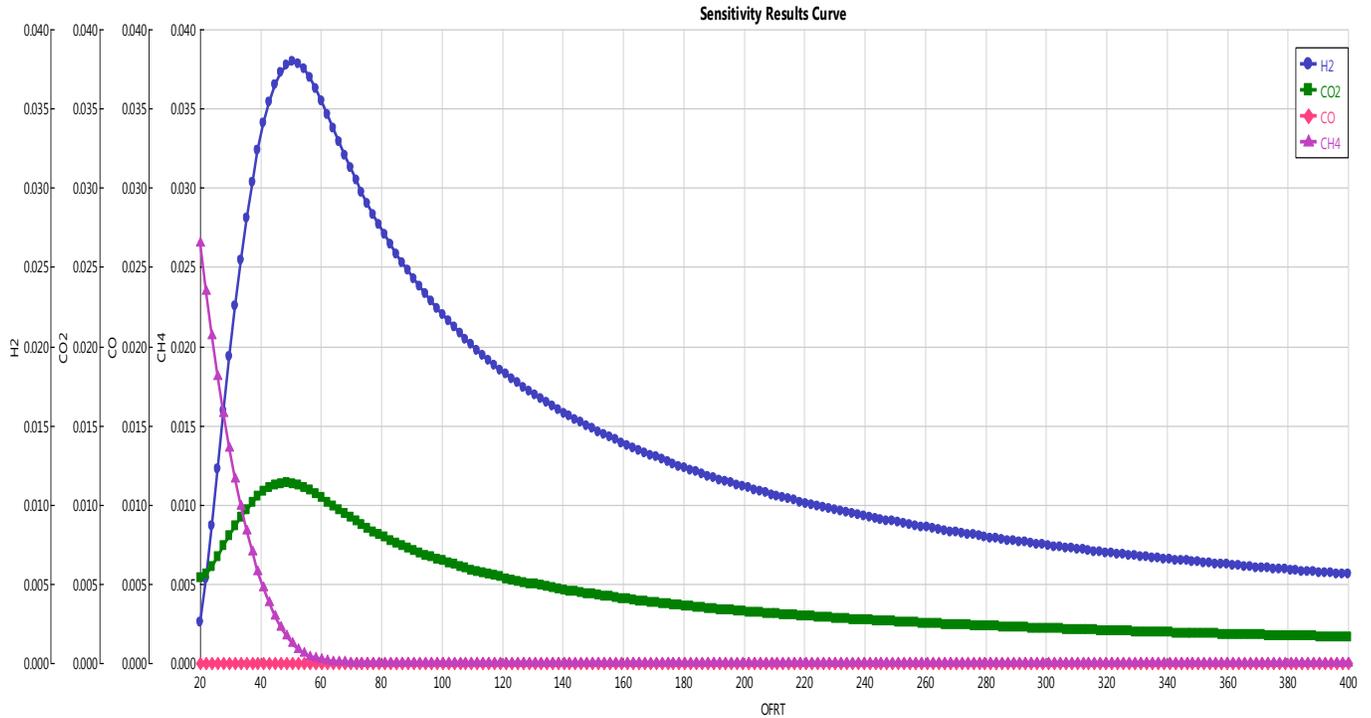
En la gráfica 10 podemos observar los datos obtenidos del análisis de sensibilidad. La relación de equivalencia en este caso no aplica ya que cuando calculas la estequiometría de la reacción de combustión no se tiene un valor para el dióxido de carbono, así entonces se grafica la relación oxidante a combustible y esta varía entre 20 y 400 para el caso del vapor de agua como oxidante. Como puntos importantes tenemos donde se tiene la mayor producción de hidrógeno ( $H_2$ ) el punto se encuentra en 50.55 como valor de la relación aire combustible real y nos da un valor máximo de producción de hidrógeno de 0.0379. El comportamiento del monóxido de carbono se tiene un punto máximo de producción con un valor cercano al cero y una relación oxidante combustible de 63.91. Para el metano podemos ver que desaparece alrededor del valor 63.91 de la relación oxidante combustible, este valor es muy similar al de la producción de monóxido de carbono, explicando estos valores con la reacción de reformación del metano.



**Gráfica 8** Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante al oxígeno puro.



**Gráfica 9** Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante al aire atmosférico.



**Gráfica 10 Relación vapor combustible real vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante vapor de agua.**

## **Análisis de la composición del gas de síntesis en el Poder Calorífico.**

Para poder analizar el poder calorífico se realizaron gráficos del poder calorífico de los gases obtenidos de la gasificación y se comparan estos valores con la composición de los gases para ver qué tipo de gas es el que nos da el mayor poder calorífico y ver si el hidrógeno es un gas importante en el impacto del poder calorífico.

## **Análisis de la composición del gas de síntesis en el poder calorífico de la gasificación con oxígeno.**

En la gráfica 11 podemos observar el análisis de sensibilidad. En el encontramos como el mayor poder calorífico se debe en su mayoría a la cantidad de metano  $\text{CH}_4$  y al hidrógeno presentes en el gas de síntesis. Al analizar el monóxido de carbono que es un gas también con un alto poder calorífico se tiene que ni en su punto máximo de producción podemos ver que el poder calorífico sea mayor al generado por el hidrógeno, comprendiendo así que el  $\text{H}_2$  es un compuesto muy volátil y con un verdadero poder calorífico aprovechable. Además, el hidrógeno es muy fácil de obtener en la

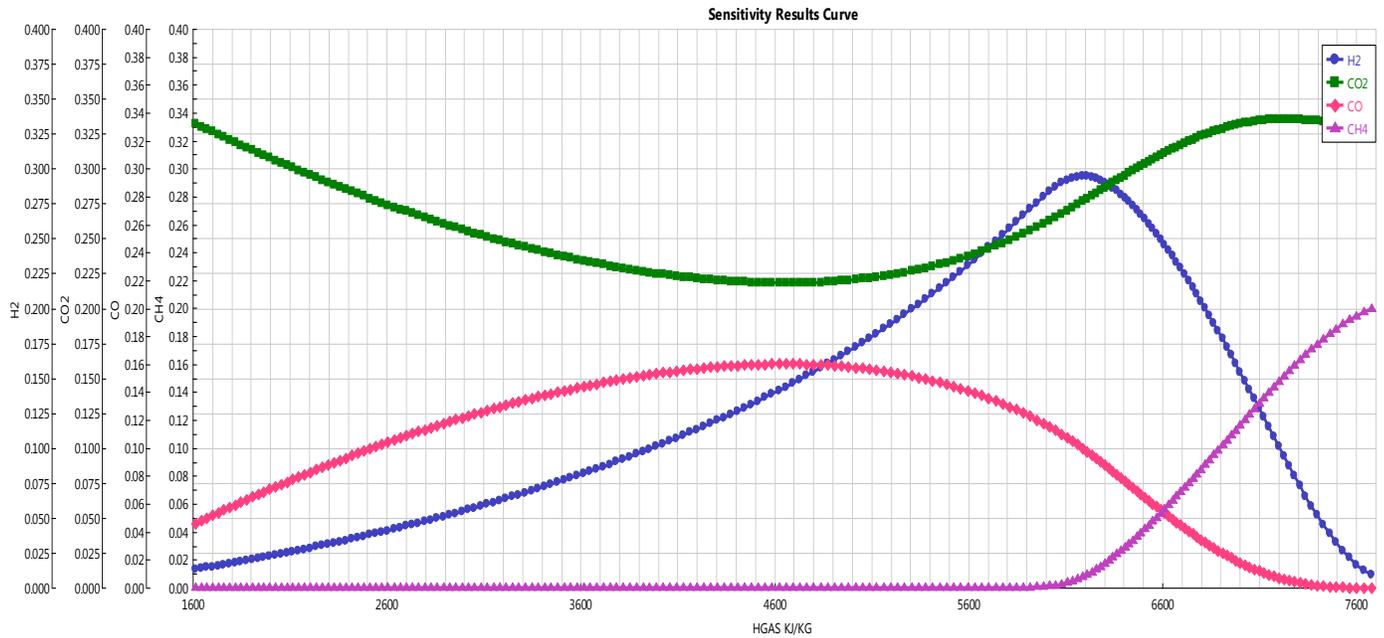
gasificación en comparación con el monóxido de carbono que se tarda un poco más en tener su punto máximo de producción si lo vemos desde un punto de la razón de equivalencia ER. El mayor poder calorífico esta al final de la gráfica del lado derecho y corresponde al valor de 6236.38 [kJ/kg] y con un valor de composición de hidrógeno de 0.2938, de monóxido de carbono con un valor de 0.0949 y de metano con un valor de 0.0112 todos en fracción molar. El máximo poder calorífico se tiene cuando la producción de hidrógeno es casi máxima combinada con la cantidad de metano producida en el gas de síntesis.

### **Análisis de la composición del gas de síntesis en el poder calorífico de la gasificación con aire.**

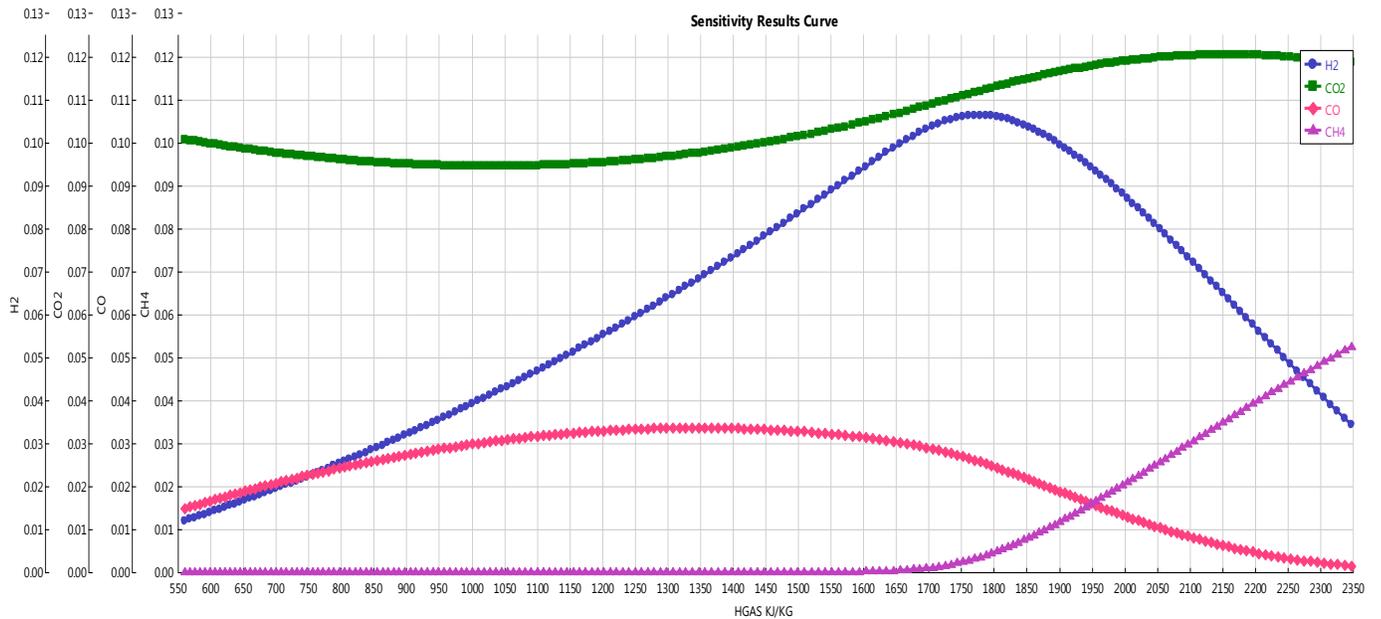
En la gráfica 12 podemos observar los resultados del análisis de sensibilidad. Se analiza como el mayor poder calorífico se deben su mayoría a la cantidad de hidrógeno y de metano presentes en el gas de síntesis o Syngas al igual que la gasificación con oxígeno puro. Al analizar el comportamiento del monóxido de carbono se observa que ni en su punto máximo de producción el poder calorífico sea mayor al máximo comparado con el que se tiene con la cantidad de hidrógeno. El mayor poder calorífico esta al final de la gráfica y corresponde al valor de 1922.43 y con un valor de composición molar de hidrógeno de 0.0972, monóxido de carbono con un valor de 0.0175 y de metano con un valor de 0.0135.

### **Análisis de la composición del gas de síntesis en el poder calorífico de la gasificación con vapor de agua.**

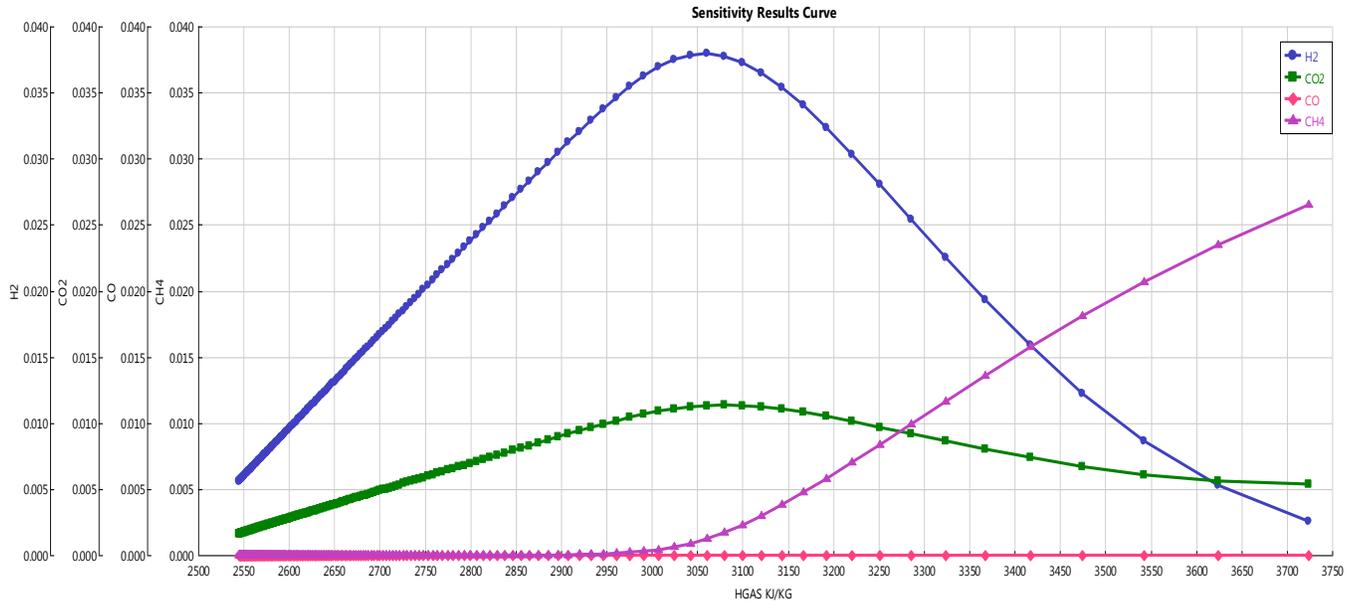
En la gráfica 13 podemos observar el análisis de sensibilidad de la gasificación con oxidante al vapor. Se puede observar como el mayor poder calorífico se debe mucho a la cantidad de hidrógeno presente en el gas de síntesis y al metano. Al analizar el monóxido de carbono vemos que está en un valor casi nulo y no pinta para nuestros resultados. El mayor poder calorífico esta al final de la gráfica y corresponde al valor de 1922.43 y con un valor de composición de hidrógeno con 0.0972, el monóxido de carbono casi con valor nulo y el metano con un valor de 0.0135. El valor del metano se vuelve importante en esta figura se vuelve importante ya que no coincide con el valor máximo del hidrógeno y entonces por eso el mayor poder calorífico lo da el metano.



**Gráfica 11 Poder Calorífico Superior PCS vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente al oxígeno puro.**



**Gráfica 12 Poder Calorífico Superior PCS vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente al aire atmosférico.**



**Gráfica 13 Poder Calorífico Superior PCS vs composición molar del gas de síntesis o Syngas en la gasificación que tiene como agente oxidante el vapor de agua.**

## **Análisis de la relación del poder calorífico de entrada con el poder calorífico de salida con la relación de equivalencia.**

## **Análisis de la relación del poder calorífico de entrada con el poder calorífico de salida con la relación de equivalencia de la gasificación con oxígeno.**

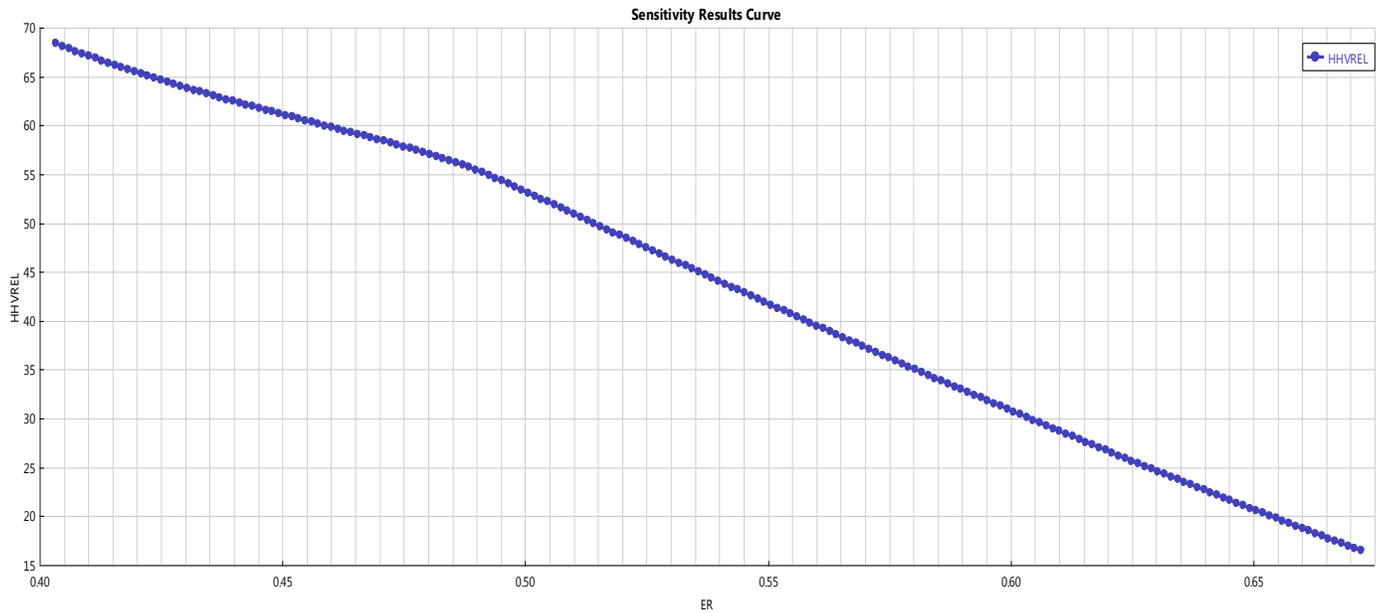
En la gráfica 14 podemos observar los datos obtenidos del análisis de sensibilidad donde se compara la relación del poder calorífico de salida con el poder calorífico de entrada y la relación de equivalencia. En la gráfica la relación del poder calorífico de salida con el poder calorífico de entrada varía entre 14.81 y 70.43. Al analizar el grafico vemos que esa relación disminuye mientras aumenta el ER ya que se utiliza mayor agente de gasificación y también el poder calorífico del gas de síntesis va disminuyendo debido a la composición del gas ya que el mayor poder calorífico corresponde donde se tiene mayor cantidad de metano.

### **Análisis de la relación del poder calorífico de entrada con el poder calorífico de salida con la relación de equivalencia de la gasificación con aire.**

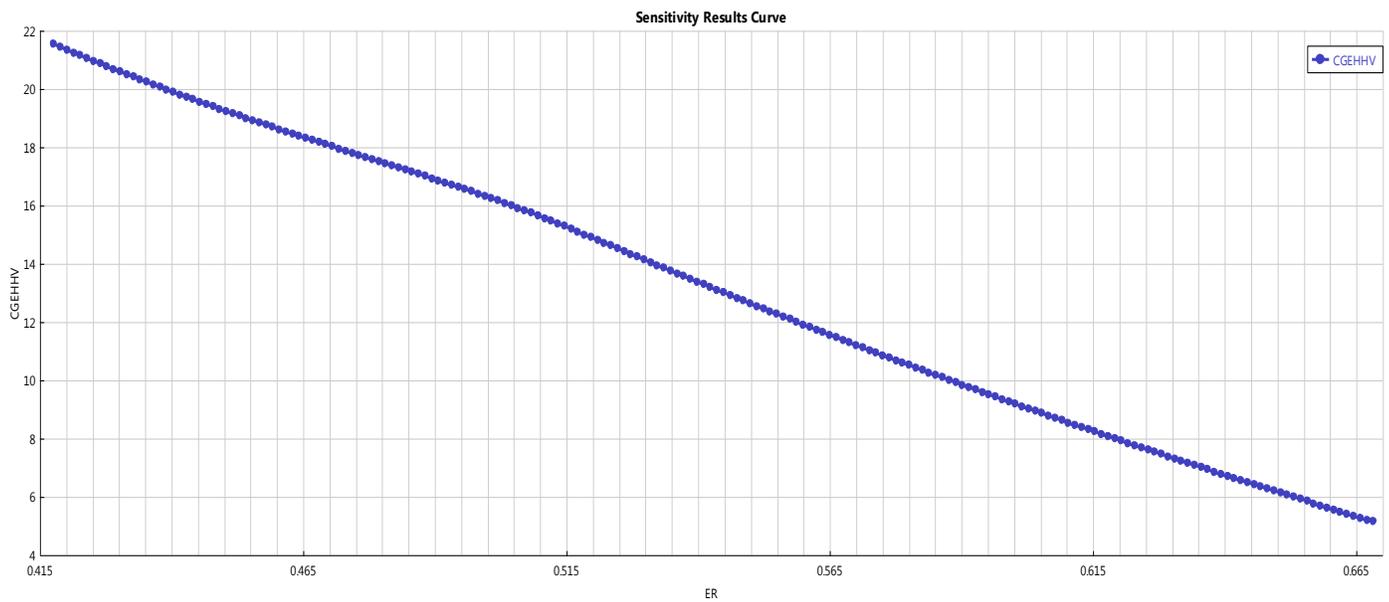
En la gráfica 15 podemos observar los datos obtenidos del análisis de sensibilidad donde se compara la relación del poder calorífico de entrada con el poder calorífico de salida y la relación de equivalencia. La relación del poder calorífico de salida con el poder calorífico de entrada varía entre 5.14 y 21.53. Como puntos importantes tenemos donde se tiene el mayor valor de este parámetro el cual se presenta en el punto inicial donde el ER es menor. Al analizar el gráfico vemos que la relación de poderes caloríficos se ven disminuidos mientras aumenta el ER ya que igual que el oxígeno al utilizar mayor agente de gasificación tenemos mayor pérdida de eficiencia energética. El valor del CGE se ve disminuido ya que depende del poder calorífico de los gases de salida y este tiene como punto máximo el inicio de la gasificación ya que el mayor poder calorífico se da en ese punto.

### **Análisis de la relación del poder calorífico de entrada con el poder calorífico de salida con la relación de equivalencia de la gasificación con vapor de agua.**

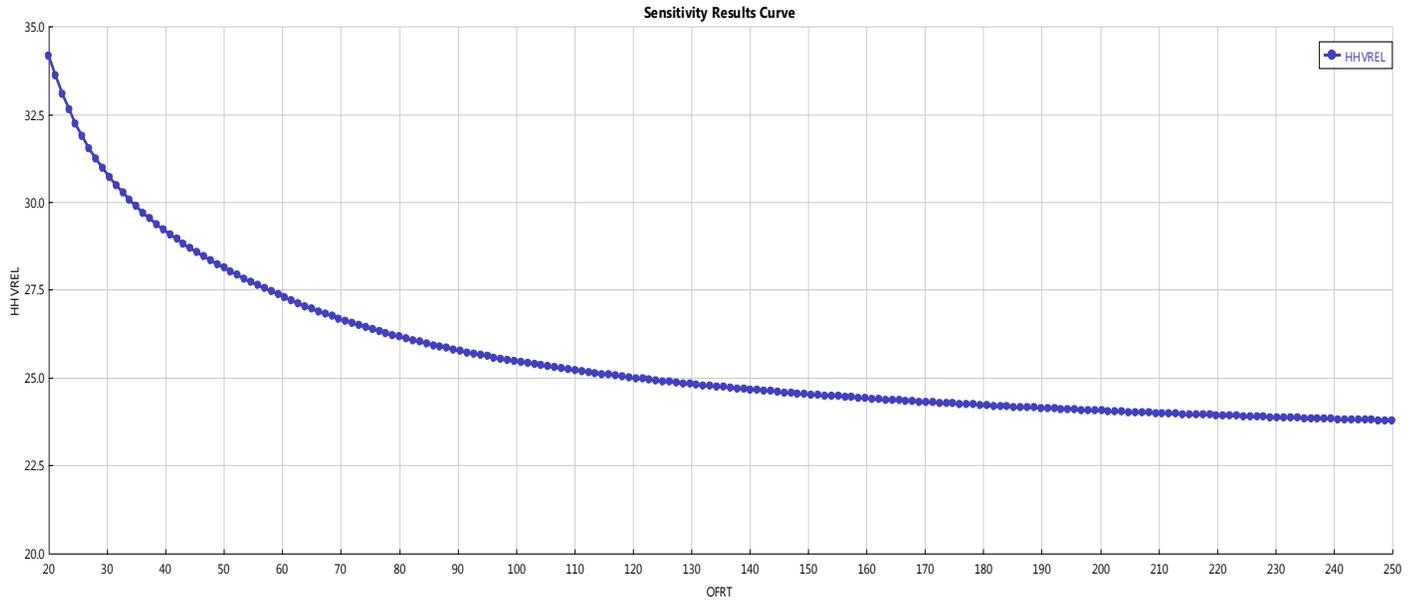
En la gráfica 16 podemos observar los datos obtenidos del análisis de sensibilidad donde se compara la relación del poder calorífico de entrada con el poder calorífico de salida y la relación de equivalencia. La relación de poderes caloríficos varía entre 23.34 y 34.15. Como puntos importantes tenemos donde se tiene el mayor valor de este parámetro el cual se presenta en el punto inicial de la gráfica que coincide con el mayor valor de poder calorífico. Al analizar el gráfico vemos que el CGE disminuye mientras la razón oxidante combustible aumenta, esto debido a que la producción de metano disminuye, la producción de hidrógeno no es suficiente para obtener un poder calorífico mayor al que se tiene con el metano y que el poder calorífico del gas de síntesis se comporta de la misma manera.



**Gráfica 14** Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs la relación del poder calorífico de salida con el poder calorífico de entrada en la gasificación con oxígeno.



**Gráfica 15** Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs la relación del poder calorífico de salida con el poder calorífico de entrada en la gasificación con aire.

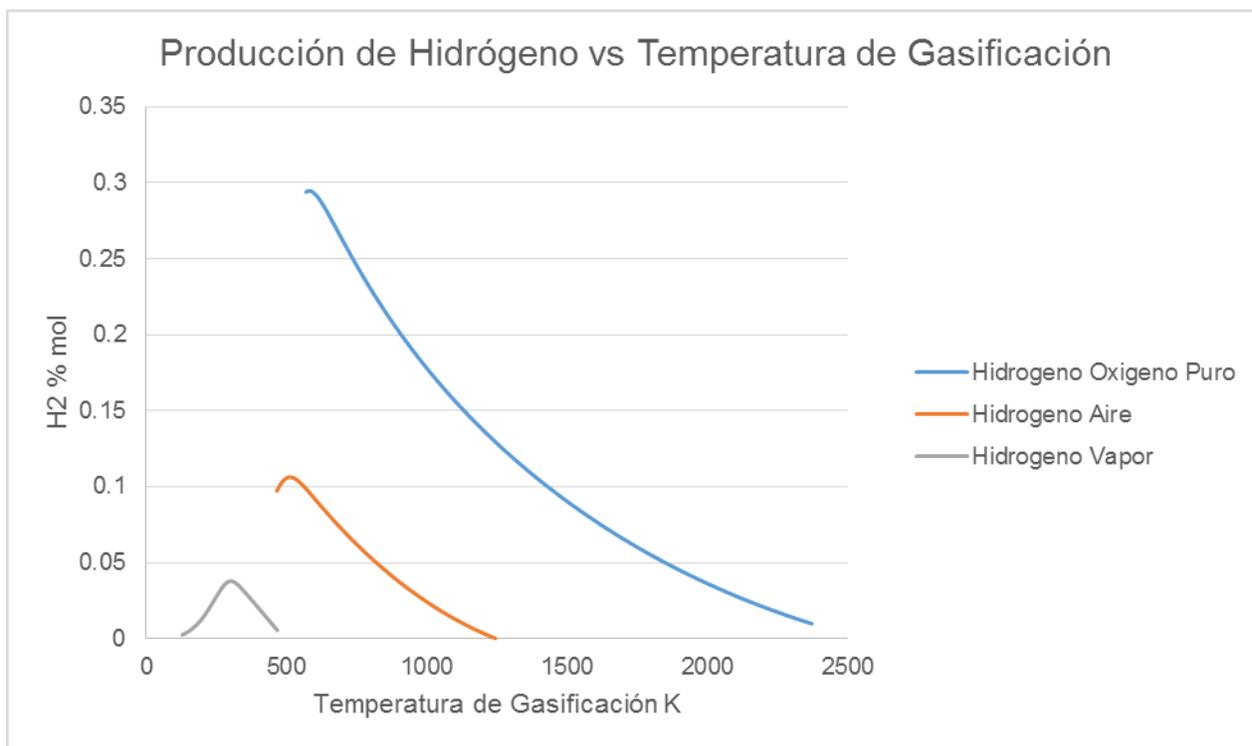


**Gráfica 16 Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs la relación del poder calorífico de salida con el poder calorífico de entrada en la gasificación con vapor.**

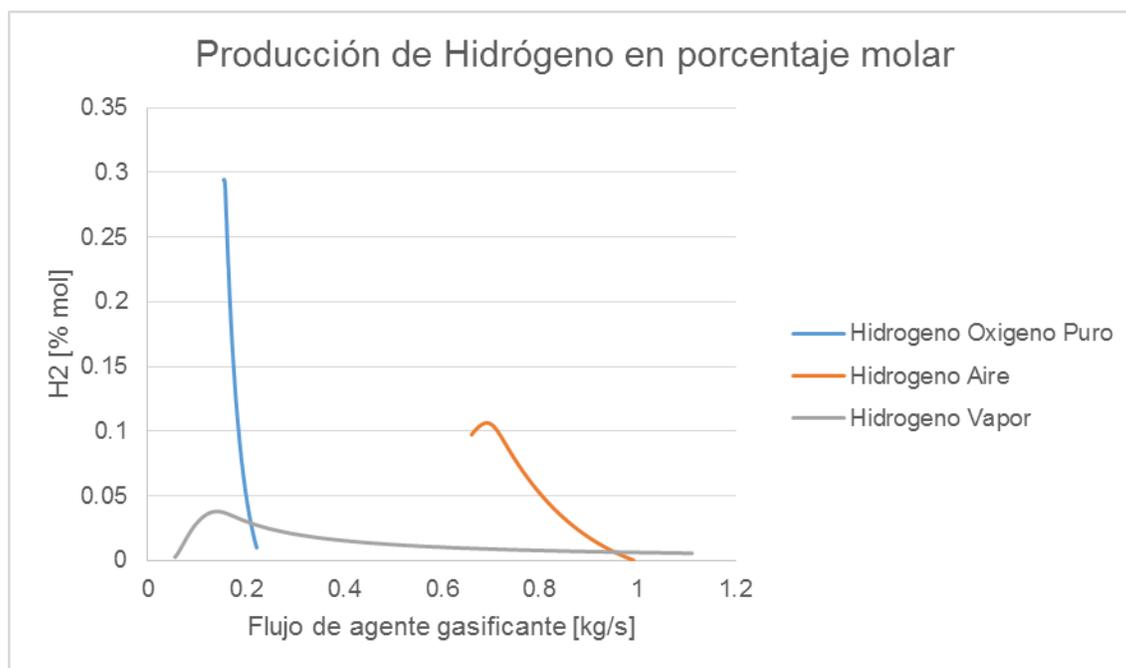
## **Análisis de producción de hidrógeno entre oxidantes.**

En la gráfica 17 podemos observar la comparación de producción de hidrógeno entre los distintos tipos de oxidantes para la composición de RSU utilizados. Al analizar la figura podemos ver que la gasificación con oxígeno puro es muy efectiva y se tiene una mayor producción de hidrógeno seguida de la gasificación con aire y por último la gasificación con vapor. Los puntos máximos correspondientes a cada agente de gasificación son: Oxígeno 0.2946, Aire 0.1063 y Vapor 0.0379. Al analizar la temperatura del gasificador podemos ver que la temperatura es muy alta con la gasificación con oxígeno puro, la temperatura baja un poco con la gasificación con aire y llega a un punto mínimo con la gasificación con vapor.

En la gráfica 18 podemos ver el análisis de sensibilidad. En la gráfica se representa la producción de hidrógeno en base molar comparada con el flujo de agente gasificante. Podemos ver que la mayor producción de hidrógeno se tiene con el oxígeno puro como agente gasificante, le sigue la gasificación con aire y la gasificación con vapor al último. Al analizar el flujo de agente gasificante se puede ver que el punto con la mayor cantidad de hidrógeno se tiene primero con la gasificación con vapor, después la gasificación con oxígeno puro y al final la gasificación con aire. Los valores de flujo en los puntos máximos son: 0.1404 para el vapor, 0.1557 para el oxígeno, 0.6926 para el aire todos estos valores expresados en unidades de kg/s.



**Gráfica 17 Temperatura de Gasificación vs composición molar de producción de hidrógeno en el gasificador con sus tres diferentes agentes gasificantes.**



**Gráfica 18 Flujo de Agente Gasificante vs composición molar de producción de hidrógeno en el gasificador.**

## **Análisis de la eficiencia de gas frío o Cold Gas Efficiency CGE.**

### **Análisis de la eficiencia de gas frío de la gasificación con oxígeno.**

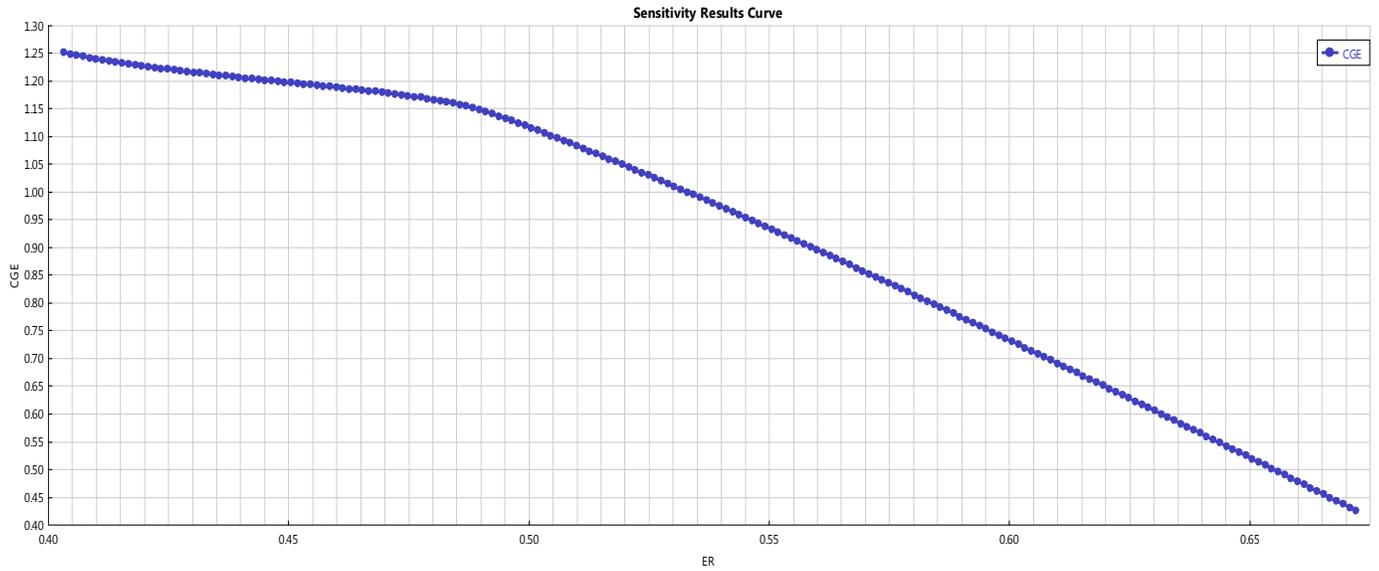
En la gráfica 19 podemos observar los datos obtenidos del análisis de sensibilidad. La Eficiencia de Gas Frío o el CGE (Cold Gas Efficiency) que es un parámetro adimensional. En la gráfica la eficiencia de gas frío varía entre 1.25 y 0.42. Al analizar el gráfico vemos que el CGE se ve disminuido mientras aumenta el ER ya que se utiliza mayor agente de gasificación y también el poder calorífico del gas de síntesis va disminuyendo aunque aumente el flujo de gas de salida es mayor la pérdida por el poder calorífico.

### **Análisis de la eficiencia de gas frío de la gasificación con aire**

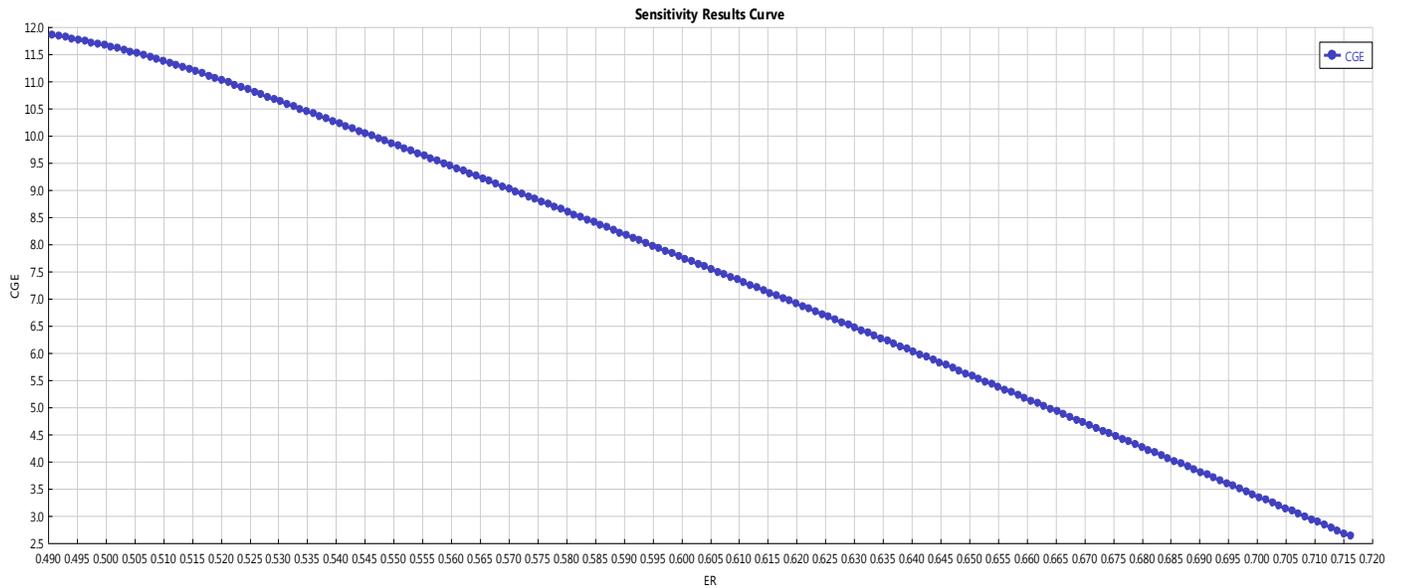
En la gráfica 20 podemos observar los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad. La eficiencia de gas frío o el CGE (Cold Gas Efficiency) es un parámetro que varía entre 11.85 y 2.62. Como puntos importantes tenemos donde se tiene el mayor valor de este parámetro el cual se presenta en el punto inicial donde el ER es menor. Al analizar el gráfico vemos que el CGE se ve disminuido mientras aumenta el ER ya que igual que el oxígeno al utilizar mayor agente de gasificación tenemos mayor pérdida de eficiencia energética. El valor del CGE se ve disminuido ya que depende del poder calorífico de los gases de salida en su mayor parte aunque al mismo tiempo depende del flujo másico de salida lo que nos denota una diferencia con el CGE de la gasificación con oxígeno puro.

### **Análisis de la eficiencia de gas frío de la gasificación con vapor de agua.**

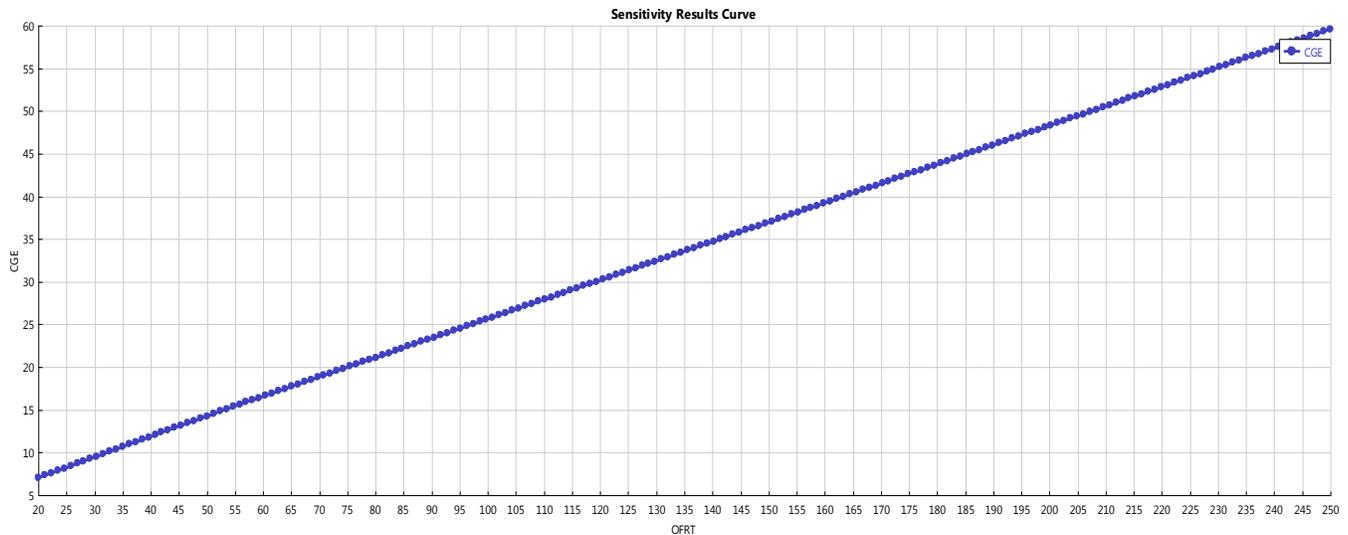
En la gráfica 21 podemos observar los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad. La eficiencia de gas frío o el CGE (Cold Gas Efficiency) es un parámetro que varía entre 7.07 y 59.59. Como puntos importantes tenemos donde se tiene el mayor valor de este parámetro el cual se presenta en el punto final de la gráfica donde el ER es menor. Al analizar el gráfico vemos que el CGE aumenta mientras aumenta el ER ya que a diferencia de la gasificación con los otros agentes de gasificación, el vapor aumenta la energía que se podría disponer del gasificador.



**Gráfica 19** Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs Eficiencia de Gas Frio o Cold Gas Efficiency CGE en la gasificación con oxígeno.



**Gráfica 20** Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs Eficiencia de Gas Frio o Cold Gas Efficiency CGE en la gasificación con aire.



**Gráfica 21 Relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER vs Eficiencia de Gas Frio o Cold Gas Efficiency CGE en la gasificación con vapor.**

## CONCLUSIONES.

En la siguiente sección se presentan las conclusiones del presente trabajo donde se comenta acerca de los resultados obtenidos de los análisis de sensibilidad analizando los valores máximos de la producción de hidrógeno y los parámetros de estudio principales de la gasificación, comparaciones entre ellos mismos, así mismo, se presenta el trabajo que se sugiere y es posible para mejorar en un futuro de la gasificación de los RSU de la ciudad de México, este trabajo sirve para mejorar la producción de hidrogeno, mejorar la calidad del gas obtenido, mejorar los parámetros principales del estudio de la gasificación así como mejorar la gasificación con lo cual se podría obtener máximos de producción de hidrógeno.

### Conclusión acerca del balance de energía.

En resultados de los balances de energía presentados que son los balances de energía del gasificador con sus tres diferentes agentes de gasificación (oxígeno puro, aire atmosférico y vapor de agua a una temperatura y presión fijas) donde en el análisis de sensibilidad se varía el flujo de masa de entrada de agente de gasificación, podemos observar que en la gasificación con oxígeno se tiene menor cantidad de energía en el gas de síntesis ya que es menor la cantidad en masa de oxidante y por tanto la energía inyectada en el agente de gasificación comparada con el gas de síntesis resultado de la gasificación con aire atmosférico y con vapor como agentes de oxidación, seguida de la energía con aire como agente de gasificación y al final la gasificación con vapor de agua como agente de gasificación, en cada caso teniendo mayor energía en el gas de síntesis por la misma razón de que se

tiene mayor cantidad en masa de agente de gasificación inyectada al gasificador, por tanto mayor cantidad de energía, así mismo de los balances de energía podemos concluir que cuando inyectamos vapor aumentamos la energía contenida en el gas de síntesis a diferencia de la gasificación con oxígeno y con aire como agentes de gasificación ya que el vapor contiene energía al aumentar su temperatura, su presión o al modificar alguna propiedad del mismo como lo es al inyectar mayor cantidad de masa que es lo que se aplica en el análisis de sensibilidad de este estudio, se obtiene mayor cantidad de energía en el resultado que es el gas de síntesis aunque la desventaja de esto es que para producir vapor de agua se necesita una fuente externa de energía para poder tener un vapor de buena calidad. De una manera paralela, se puede concluir que mientras mayor cantidad de agente de gasificación se tenga, la energía en el gas de síntesis va disminuyendo al punto donde la gasificación dejaría de ser un proceso viable ya que lo que se busca es aumentar la energía del gas de síntesis y aprovecharla con excepción de si el agente de gasificación varía en sus propiedades. En cuanto a la producción de hidrógeno que es el objeto del presente estudio que la máxima cantidad de energía no se presenta en el punto donde se tiene la mayor producción de hidrógeno aunque si se profundiza más el estudio es posible encontrar que ese punto podría ser el máximo ya que la cantidad de energía en el gas de síntesis depende mucho de la composición del gas pero esto se explica en los próximos párrafos.

### **Conclusión acerca de la temperatura del gasificador.**

En los resultados del análisis de sensibilidad de la temperatura de salida de los gases de gasificación y la composición molar del gas de síntesis podemos observar que la gasificación con oxígeno se maneja mayor temperatura de los gases de salida seguido por la gasificación con aire y al último la gasificación con vapor de agua, esto debido a que se tiene mayor calidad en la gasificación con oxígeno, después gasificación con aire atmosférico y por último la gasificación con vapor de agua. Al hablar de calidad nos referimos a que como analizamos en el balance de energía, se necesita menor cantidad de masa para obtener un gas de síntesis del mismo tipo de composición molar la cual puede ser observada en los análisis de sensibilidad de la temperatura de salida del gas de síntesis del gasificador. Al analizar esta temperatura se puede concluir que en trabajos futuros podría manipularse dependiendo de la aplicación que se quiera llegar y del sistema de separación que se diseñaría para poder limpiar los gases de los contaminantes formados como el amoníaco y el ácido sulfhídrico. En cuanto a la temperatura donde la producción de hidrógeno es mayor a partir de los RSU es mayor con la gasificación con oxígeno, seguida de la gasificación con aire y al final la gasificación con vapor de agua, al igual que con el sistema de separación se tendría que analizar primero la aplicación futura del

gas de hidrógeno, si esta sería para producción de energía eléctrica o en aplicaciones de uso para el transporte o para fines de uso industrial.

### **Conclusión acerca de la relación de equivalencia o Equivalence Ratio ER.**

En los resultados del análisis de sensibilidad de la relación de equivalencia de los agentes de gasificación y la composición molar del gas de síntesis podemos observar que en la gasificación con oxígeno se tienen valores de la relación menores a los de la gasificación con aire ya que es necesaria mayor cantidad de agente de gasificación. En cuanto a la gasificación con vapor de agua no existe el parámetro de la relación de equivalencia pero se usa una relación de agente de gasificación y el combustible usado, esta relación es muy grande ya que se necesita mucho vapor para poder gasificar los RSU. En los puntos de máxima producción de hidrógeno se encontró que son cercanos a 0.5 en los dos casos de gasificación con oxígeno puro y aire atmosférico aunque se presenta primero con el oxígeno puro y después con el aire contando con una pequeña diferencia. En el caso de la gasificación con vapor de agua, la relación agente de gasificación y combustible es un valor alto. Para trabajo a futuro en este aspecto se podría calcular con diferentes composiciones de RSU y ver como se mueve la relación de equivalencia ya que en la literatura se encontró que para la biomasa es cercano a 0.34, entonces este parámetro depende mucho de la composición que se obtiene del análisis último y la humedad del combustible usado. En cuanto a la producción de hidrógeno con vapor de agua se podría analizar a diferentes temperaturas y presiones del vapor utilizado ya que en los resultados obtenidos se puede observar que se tiene una buena producción de hidrógeno y con lo analizado en los artículos científicos se podría obtener mayor cantidad de hidrógeno con un vapor en condiciones críticas aunque bien se podría hacer un análisis de optimización con objetivo una mayor producción de hidrógeno.

### **Conclusión acerca del poder calorífico.**

En cuanto a los resultados del poder calorífico y la composición molar del gas de síntesis se pudo observar en el análisis de sensibilidad que el mayor poder calorífico se obtiene de la gasificación con oxígeno, seguido de la gasificación con vapor de agua y al final la gasificación con aire. Este parámetro depende mucho de la composición molar del gas de síntesis, lo que en un trabajo a futuro se tendría que caracterizar la composición del gas metano con exactitud ya que es el compuesto que nos indica donde hay un mayor poder calorífico al igual que el hidrógeno que son los gases con mayor influencia en el resultado del poder calorífico obtenido en la gasificación. De los resultados se puede deducir de las gráficas de composición molar del poder calorífico que la producción de hidrógeno aumenta si se usa vapor como agente oxidante, si aumentásemos la presión, la temperatura del vapor obtendríamos en la composición una mayor cantidad de hidrógeno lo que se sugiere como trabajo a

futuro poder analizar en qué presión y temperatura se obtiene la máxima producción de hidrogeno en el gas de síntesis, se sugiere hacer una investigación al respecto tanto para mejorar la producción de hidrógeno como para mejorar el poder calorífico del gas de síntesis en sus dos variantes las que se obtendrían de la optimización de producción del gas metano y el gas de hidrógeno.

### **Conclusión acerca de la eficiencia de gas frio o cold gas efficiency (CGE).**

En los resultados del análisis de sensibilidad de la eficiencia de gas frio y la relación de equivalencia se pudo observar que tanto para la gasificación con oxígeno como para la gasificación con aire la relación de equivalencia o CGE disminuye en su valor mientras aumenta el valor de la relación de equivalencia, en cambio, en la gasificación con vapor de agua como agente oxidante se observa que la relación agente de gasificación y combustible va en aumento mientras se va inyectando vapor de agua. En un trabajo a futuro en este aspecto se sugiere ver cómo llegar a un aumento de la relación de equivalencia o CGE en la gasificación con oxígeno y con aire, que se podría dar con una combinación de agentes de gasificación, en cuanto a la relación agente de gasificación y combustible se podría disminuir la cantidad de agente de gasificación también haciendo una combinación de agentes de gasificación con el oxígeno y el aire atmosférico obteniendo así una gasificación con mejora de este parámetro y disminuyendo la cantidad de vapor de agua utilizado para llegar a la gasificación de los RSU.

### **Conclusión general.**

Como conclusión general podemos decir que en la gasificación para obtener una producción mayoritaria en hidrógeno de los RSU de la Cd. de México se lleva a cabo a una temperatura alrededor de los 500°C a 600°C con aire atmosférico y con oxígeno como agentes de gasificación suministrados a temperatura ambiente, y con vapor de agua la gasificación depende de la presión y la temperatura del vapor inyectado aunque en el presente estudio se analiza una temperatura alrededor de los 300°C. De igual manera, se concluye que la relación de equivalencia siempre está cercana al valor de 0.5 en las simulaciones y que la relación agente de gasificación combustible en la gasificación con vapor de agua es una relación bastante grande por lo cual es necesario mucho vapor de agua para poder llevar a cabo la gasificación. También se puede concluir que el poder calorífico depende mucho de la composición molar del gas de síntesis y que es importante analizarla a fondo ya que en nuestro análisis el gas metano desaparece a una temperatura alrededor de los 700°C por el manejo de las propiedades del mismo software (ASPEN plus) aunque en la realidad se tendría otra curva de composición no muy diferente a la obtenida en el presente estudio ya que el software se apega a la realidad de las propiedades de los elementos y compuestos utilizados con sus excepciones en este caso las propiedades del metano, por tanto se tendría un poder calorífico diferente en donde se tiene

la mayor producción de hidrógeno aunque esto no nos diría que ese punto es donde se tiene el mayor poder calorífico por eso el énfasis de realizar ese análisis en las simulaciones. En cuanto a la eficiencia de gas frío se tiene un comportamiento similar ya que la eficiencia de gas frío depende de la cantidad en masa del gas de síntesis obtenido y del poder calorífico del gas de síntesis, así que si se tuviese en primer instancia una caracterización exacta del gas se tendría solo la dependencia de la cantidad de gas producida y esa depende mucho del tipo de agente de gasificación utilizado ya que en nuestros resultados podemos observar que se puede obtener una buena composición molar de gas con oxígeno como agente de gasificación, se puede obtener mayor cantidad de gas y mayor energía al utilizar vapor de agua y aire como agentes de gasificación aunque por desventaja, el vapor de agua se requiere de una fuente de energía externa para poder producirlo. Para finalizar como conclusión del poder calorífico y la eficiencia de gas frío, se recomienda y propone que se podrían mejorar estos parámetros con la combinación de agentes de gasificación, al mismo tiempo que la producción de hidrógeno aumentaría al hacerlo, al combinar los de agentes de gasificación se obtendrían mejoras de todos los parámetros, ya sea aumento de producción de gas de hidrógeno, aumento de poder calorífico, disminución de uso en cantidad de masa de los agentes de gasificación, disminución de temperatura del gas de síntesis. Esta combinación de agentes de gasificación primero dependería de límites de producción del gas de hidrógeno y también de su aplicación del gas de síntesis obtenido, también dependería de los costos del reactor y de los agentes de gasificación, al mismo tiempo que dependería del sistema que se diseñaría para el aprovechamiento de la energía obtenida en el gasificador aunque antes de diseñar ese sistema se tendría que hacer una evaluación técnica económica para analizar su viabilidad de operación simulando matemáticamente los posibles resultados. También, al observar esas mejoras posibles en el gasificador que dependen mucho del agente de gasificación, estas mejoras se verían limitadas por el costo de cada uno de los agentes de gasificación, en el caso del oxígeno es muy caro suministrarlo puro, en el caso del aire hay que utilizar un compresor para poder inyectarlo y mejorar sus propiedades, y en el caso del vapor de agua se vería limitado al costo de producción de vapor de agua que se tendría en la planta ya que el costo del vapor depende mucho de la calidad del mismo, depende de la presión y la temperatura, depende de su uso y de si el vapor de agua se utiliza para uno o varios servicios dentro la planta. A estas mejoras y limitaciones se recomienda hacer un análisis de optimización teniendo como restricciones los costos y cantidad de energía suministrada al gasificador para así poder obtener la mejora en la gasificación. Como trabajo a futuro también se debe de diseñar la secuencia de separación de los contaminantes generados en el gasificador y mejoras en el proceso de gasificación como sugerencia el precalentamiento del agente de gasificación esto pudiéndose llevar a cabo diseñando una red de intercambiadores de calor. Finalmente, dependiendo de la aplicación que se quiera llevar a cabo del

uso del gas de hidrógeno producido en la gasificación se determinaría el diseño de todo el proceso tanto de separación como de la red de intercambiadores de calor.

## REFERENCIAS

1. **Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.** *La situación de los residuos sólidos en México.* 2007.
2. **México, Gobierno de la Ciudad de.** *Inventario de Residuos Sólidos CDMX 2014.* Ciudad de México : s.n., 2015.
3. **Basu, Prabir.** *Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory.* 2010.
4. **Organizacion Latinoamericana de Energía.** 2006.
5. *Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A Review.* **Arena, Umberto.** Issue 4, Second University of Naples, Via A. Vivaldi 43 Italy : Elsevier, 2012, Vol. 32.
6. *The effect of preheating in a biomass CFB gasifier using ASPEN plus simulation.* **Wayne Doherty, Anthony Reynolds, David Kennedy.** Issue 9, Dublin Ireland : Elsevier, 2009, Vol. 33.
7. *Simulation of hybrid biomass gasification using ASPEN plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste.* **Naveed Ramzan, Asma Ashraf, Shahid Naveed, Abdullah Malik.** Issue 9, s.l. : Elsevier, 2011, Vol. 35.
8. *Performance analysis of an Integrated fixed bed gasifier model for different biomass feedstocks.* **Sharmina Begum, Mohammad G. Rasul, Delwar Akbar, Naveed Ramzan.** 6508-6524, s.l. : Energies, 2013, Vol. 6(12).
9. *Mexico City's Municipal Solid Waste characteristics and composition analysis.* **Alfonso Durán Moreno, Manuel Garcés Rodríguez, Adriana Rocío Velasco, Juan Carlos Marín Enríquez, Rafaela Gutiérrez Lara, Norma Angélica Delgadillo Hernández.** (1), Ciudad de México : Int. Contam. Ambie., 2012, Vol. 29.
10. *A comparative study of gasification of food waste (FW), poultry waste (PW), municipal solid waste (MSW) and used tires (UT).* **S. Naveed, A Malik, N Ramzan and M. Akram.** Issue 27, Lahore Pakistan and United Kingdom : Nucleus, 2009, Vol. 41.
12. **Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.** *Diagnostico básico para la gestión integral de los residuos.* 2012.
13. *El hidrógeno y la energía. Análisis de la situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas.* **José Ignacio Linares Hurtado, Beatriz Yolanda Moratilla Soria.** 2007.

<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/external/input-data-to-polestar-model>

<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/municipal-waste-generation-outlook-from-oecd>

<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/345/sresiduos.html>

[http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_resumen/08\\_residuos/cap8.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/08_residuos/cap8.html)

<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd61/tecnadmvo/cap5.pdf>

<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/495/residuos.html>

<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/495/especial.html>

<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/495/peligrosos.html>

[http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_2008/07\\_residuos/cap7\\_1.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008/07_residuos/cap7_1.html)

[http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_2008/00\\_intros/introduccion.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008/00_intros/introduccion.html)