

GENERACION DE ENERGIA A PARTIR DE LA OXIDACIÓN EN DOS ETAPAS
CON RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

ANDREA NATALIA MONSALVE LEON LAURA ESTEFANIA GARCIA REYES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA INGENIERÍA EN ENERGÍA
BUCARAMANGA, COLOMBIA

2019

GENERACION DE ENERGIA A PARTIR DE LA OXIDACIÓN EN DOS ETAPAS
CON RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA CIUDAD DE BUCARAMANGA

ANDREA NATALIA MONSALVE LEON LAURA ESTEFANIA GARCIA REYES

Proyecto de Grado para optar al Título de Ingeniero en Energía

Directora: Ana Lisbeth Galindo

Codirector: Alexander Meneses

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA INGENIERÍA EN ENERGÍA

BUCARAMANGA, COLOMBIA

2019

Nota de Aceptación

Firma director de proyecto de grado

Firma Codirector de proyecto de grado

Firma Calificador

Bucaramanga, 2019

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	7
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	8
LISTA DE GRÁFICAS.....	9
LISTA DE ANEXOS.....	10
GLOSARIO.....	11
RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. BIOMASA.....	15
1.1 TIPOS DE BIOMASA.....	15
1.1.1 Recursos Forestales.....	15
1.1.2 Recursos Agrícolas.....	16
1.1.3 Cultivos Energéticos.....	16
1.1.4 Recursos Pecuarios.....	16
1.1.5 Recursos Agroindustriales.....	16
1.1.6 Residuos Urbanos.....	17
1.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DEL RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS(RSU)	17
1.2.1 Potencial de residuos en la ciudad de Bucaramanga.....	18
1.3 TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PARA LA	
GENERACIÓN DE ENERGÍA.....	18
1.4 GASIFICACIÓN.....	19
1.4.1 Agente Gasificante.....	20
1.4.2 Tipos de gasificadores.....	20
1.4.3 Etapas del proceso de gasificación.....	22
1.5 OXIDACIÓN EN DOS ETAPAS.....	25
1.6 SOFTWARE DE SIMULACIÓN.....	27
2 OBJETIVOS.....	28
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	28
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28

3	METODOLOGÍA.....	29
3.1	FASE I.....	29
3.2	FASE II.....	29
3.3	FASE III.....	30
4	DESARROLLO.....	32
4.1	FASE I: CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA.....	32
4.1.1	Composición Física de los RSU de Bucaramanga.....	32
4.1.2	Composición Química de los RSU de Bucaramanga.....	34
4.1.3	Cálculo del Poder Calorífico.....	35
4.1.4	Selección de oxidación en dos etapas.....	35
4.2	FASE II: PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN DE LA TECNOLOGÍA....	37
4.2.1	Zona de Secado.....	37
4.2.2	Zona de Pirolisis.....	38
4.2.3	Zona de reducción.....	39
4.2.4	Zona de Oxidación.....	40
4.2.5	Análisis Pinch.....	40
4.2.6	Ciclo Rankine.....	41
4.3	FASE III: SIMULACIÓN DEL PROCESO.....	43
4.3.1	Gasificación en dos etapas.....	44
4.3.2	Ciclo de generación de energía.....	52
5	RESULTADOS.....	55
5.1	ANÁLISIS ÚLTIMO Y ANÁLISIS PRÓXIMO.....	55
5.2	CONTENIDO ENERGÉTICO DE LOS RSU.....	56
5.3	COMPONENTES DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN.....	57
5.3.1	Incidencia de la relación de equivalencia en la formación de componentes.....	57
5.3.2	Incidencia de la relación de equivalencia en la temperatura de la reducción.....	59
5.3.3	Incidencia de la relación de equivalencia en la generación de hidrogeno	60
5.3.4	Relación H ₂ :CO.....	61
5.4	APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS.....	63

5.4.1	Incidencia de la relación de equivalencia en el calor generado en la combustión.....	63
5.4.2	Incidencia de la relación de equivalencia en la potencia de la turbina 64	
5.5	EMISIONES CONTAMINANTES.....	65
5.6	GENERACIÓN DE ENERGÍA.....	66
5.6.1	Eficiencia del proceso	66
6	CONCLUSIONES	68
7	RECOMENDACIONES.....	70
8	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	ANEXOS.....	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Reacciones de la reducción y oxidación. Realización Propia	39
Tabla 2 Flujo másico de aire en el secado. Realización Propia.....	47
Tabla 3 Análisis último de los residuos. Fuente Propia.....	55
Tabla 4 Análisis próximo de los residuos. Fuente Propia	56
Tabla 5. Fracción molar de los gases de reducción según la relación de equivalencia	58
Tabla 6 Fracción molar de los gases de oxidación según la relación de equivalencia	59
Tabla 7 Comparación concentraciones de contaminantes. Fuente: Resolución 058 de 2002. Ministerio de Ambiente. Realización Propia.....	65

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Gasificador Downdraft. Realización Propia.	21
Ilustración 2 Gasificador Updraft. Realización Propia.....	21
Ilustración 3 Oxidación en dos etapas. Realización Propia.	26
Ilustración 4 Método de cuarteo. Realización Propia.....	33
Ilustración 5 Diagrama de Análisis Pinch. Realización propia	41
Ilustración 6 Termodinámica del Ciclo Rankine. Realización Propia	42
Ilustración 7 Diagrama del proceso simulado. Realización propia. Fuente: Syngas from Waste, Emerging Technologies.....	45
Ilustración 8 Compuestos que intervienen en el proceso. Fuente: Aspen Plus.....	46
Ilustración 9 Proceso de secado. Fuente: Aspen Plus.....	48
Ilustración 10 Proceso Flash. Fuente: Aspen Plus.....	48
Ilustración 11 Proceso de pirólisis. Fuente: Aspen Plus	49
Ilustración 12 Distribución de los productos de la pirólisis.....	50
Ilustración 13 Proceso de Reducción. Fuente: Aspen Plus	51
Ilustración 14 Proceso de separación de sólidos. Fuente: Aspen Plus.....	51
Ilustración 15 Proceso de combustión. Fuente: Aspen Plus	52
Ilustración 16 Diagrama de proceso de ciclo Rankine. Realización propia.....	53
Ilustración 17 Diagrama de proceso de oxidación en dos etapas. Realización Propia	57

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Poder Calorífico de biomasa residual en Colombia. Realización Propia. Fuente: Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el Departamento de Cundinamarca.....	56
Gráfica 2 Fracciones de productos de la reducción según la relación de equivalencia. Fuente Propia	58
Gráfica 3 Temperatura de reducción según relación de equivalencia. Fuente Propia	60
Gráfica 4 Generación de hidrogeno según la relación de equivalencia. Fuente Propia	61
Gráfica 5 Relación H ₂ /CO. Fuente Propia	62
Gráfica 6 Calor en el intercambiador según la relación de equivalencia	63
Gráfica 7 Potencia bruta de la turbina según la relación de equivalencia.....	64

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Composición física. “Caracterización de los residuos generados en el municipio de Bucaramanga”. 2015. Realizada por UIS y CAMVILL.S.A.S	75
ANEXO B. Valores de análisis último para cada tipo de residuo	76
ANEXO C. Valores de análisis próximo para cada tipo de residuo.....	77

GLOSARIO

CHAR	Residuo Sólido Carbonoso
EES	Engineering Equation Solver
MCI	Motor de Combustión Interna
MSW	Municipal Solid Waste
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEAD	Polietileno de Alta Densidad
PET	Tereftalato de Polietileno
PEBD	Polietileno de Baja Densidad
PS	Poliestireno
PVC	Policloruro de Vinilo
RAE	Residuos a Energía
RAES	Residuos eléctricos y electrónicos
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
RE	Relación de Equivalencia
RESPEL	Desechos peligrosos
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SYNGAS	Gas de Síntesis
TAR	Alquitrán de Hulla
UIS	Universidad Industrial de Santander

RESUMEN

El siguiente documento tiene como objetivo comprobar, mediante simulación, la posibilidad de generación de energía mediante la tecnología conocida como oxidación en dos etapas, utilizando como fuente de alimentación los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Bucaramanga, esto como medio de aprovechamiento de los residuos ante la problemática de disposición final existente en el relleno sanitario de la ciudad.

El sistema de oxidación en dos etapas se modela como un gasificador de tipo updraft que utiliza como agente gasificante aire. Como entrada al proceso se usa la composición teórica de los RSU de la ciudad, que presentan un poder calorífico de 16.465,434 kJ/kg.

El proceso de la gasificación se realizó en el software Aspen Plus, definiendo las condiciones de las corrientes de ingreso y de trabajo de las diferentes fases, teniendo siempre en cuenta que los valores concordaran con información de estudios previo para asegurar la veracidad de los datos. También se estipulan las reacciones típicas que ocurren en las zonas de reducción y oxidación de un gasificador de este tipo. El proceso de generación de energía se realiza con ayuda del software Matlab y de la herramienta de cálculo EES, donde se determina la generación de energía mediante la turbina de vapor de un ciclo Rankine, vapor generado gracias al aprovechamiento de calor de los gases de combustión de la oxidación en dos etapas.

Los resultados muestran que, con una relación de equivalencia de 0,2 se logra el mejor aprovechamiento energético de los residuos, lográndose un valor de calor de 1.069.170 kJ/h en los gases de combustión que se traducen, en la generación de energía eléctrica, en 819.850 kWh/año.

También, con esta RE se logra el control de las emisiones liberadas a la atmósfera, siendo los componentes liberados principalmente H₂O, CO₂, N₂ y O₂, además se confirma con la resolución 058 de 2002 del Ministerio de Ambiente de Colombia, que las emisiones de los agentes contaminantes se encuentran dentro de los límites permitidos. Con el desarrollo y funcionamiento de esta tecnología se logra la utilización y aprovechamiento de 840 toneladas de residuos sólidos urbanos al año.

Palabras Clave: Oxidación en dos etapas, generación de energía, Residuos Sólidos urbanos, Aspen Plus.

INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos urbanos son productos provenientes de la actividad humana que no tienen posibilidad de volver a la naturaleza o generalmente no son debidamente tratados para este fin [1]. La necesidad de su correcta disposición se vuelve de vital importancia dado su acelerado aumento a nivel mundial sumado al deficiente proceso de tratado que reciben en ciertos países, causando serios daños a los ecosistemas, contribuyendo a la contaminación del recurso suelo, hídrico, aire y paisaje, amenazando la sustentabilidad ambiental de los sistemas urbanos [2].

Colombia no es un país ajeno a esta problemática, según el Departamento Nacional de Planeación 105 municipios poseen sistemas inadecuados de disposición (quema, botaderos a cielo abierto, enterramiento) y 891 poseen sistemas considerados “adecuados”, como rellenos sanitarios, sin embargo, algunos de ellos sucumben un mal manejo y falta de control [3].

Un claro ejemplo se da en la ciudad de Bucaramanga con el relleno sanitario El Carrasco, el cual recibe 1000 toneladas de desechos al día [4] provenientes de 16 municipios. Este sitio, que no cuenta con licencia ambiental ni con todos los lineamientos necesarios para ser considerado relleno, ha venido cumpliendo esta función por más de 30 años [5]. Presentando problemas durante el proceso de disposición diario, como el no cubrimiento total de residuos sólidos, fallas en las tuberías de conducción que producen brotes de lixiviados, daño en los sistemas de filtros, entre otros. Se tiene como consecuencia graves afectaciones ambientales, como contaminación de aguas superficiales y subterráneas por lixiviados, generación de olores y gases que comprenden compuestos nitrogenados y sulfurados, dióxido de carbono, óxido nitroso y metano [6], entre otros, así como afecciones de tipo social para los residentes de las zonas cercanas al relleno y los demás ciudadanos de Bucaramanga que dependen de este espacio para la disposición de sus residuos.

En el mundo estas problemáticas son tratadas mediante procesos como reciclaje, digestión anaerobia y compostaje aerobio, y recuperación de energía a partir de los desechos. Este último se ha desarrollado desde hace casi 40 años con tecnologías de plantas de combustión principalmente, sin embargo, recientemente se ha implementado procesos como la gasificación para la obtención de gas de síntesis, el cual puede ser utilizado para la generación de potencia, energía térmica, productos químicos, combustibles líquidos o hidrogeno. A pesar de ello, para todo lo anterior se requiere de un proceso extra como lo es el tratamiento de limpieza del gas de síntesis para eliminar gases ácidos, partículas, alquitrán y otras impurezas

del gas crudo que imposibilita su uso para la generación de energía en turbinas y motores de combustión interna [7].

Es por esto que se han desarrollado nuevas tecnologías a partir de la gasificación convencional, entre ellas, la oxidación en dos etapas. Esta tecnología se lleva a cabo mediante los mismos procesos de la gasificación convencional, pero difiriendo en el orden de sus dos últimas fases, siendo las etapas del proceso: secado, pirólisis, oxidación primaria o reducción y oxidación secundaria u oxidación. En la oxidación en dos etapas, tras el proceso de reducción, se produce syngas crudo que como se mencionó anteriormente no puede ser usado en sistemas de generación de potencia, por lo que se usa como combustible en una cámara de combustión. El calor producido en la oxidación es usado entonces para generación de vapor y energía en un ciclo Rankine. De esta manera, los productos de la oxidación no son los que tienen contacto directo con los sistemas de generación de energía, eliminando el proceso de tratamiento que se debe hacer convencionalmente que, además, aumenta el costo de las plantas de gasificación. [8]

La oxidación en dos etapas se ha llevado a cabo en países como Noruega [7], donde ya existen cinco plantas de este tipo, Alemania con una y Reino Unido con cuatro plantas. En Uruguay también se ha propuesto la viabilidad de la implementación de esta tecnología. En la ciudad de Paysandú, donde se realiza este estudio, no se hace separación o clasificación de las basuras que llegan al lugar de disposición [8], situación similar a la presentada en Bucaramanga.

En todos los casos donde se ha desarrollado la oxidación en dos etapas se presentan beneficios de control de emisiones y reducción del uso de espacio ocupado por los residuos.

El desarrollo de este tipo de tecnologías en Colombia se incentiva no solo por los beneficios nombrados anteriormente, sino además porque actualmente el país cuenta con el decreto 1784 del 2017, en el cual el Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, indica: “la búsqueda de otros sistemas, además de los rellenos sanitarios, como medida para mejorar la calidad ambiental, garantizando mayor capacidad operativa y mejores controles donde, además, se fomente el apoyo tecnológico para la generación energética” [9].

Teniendo en cuenta la información anterior se optó por escoger la tecnología de oxidación en dos etapas y realizar el montaje del sistema para las condiciones de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Bucaramanga en un software de simulación para determinar la generación de energía y analizar los posibles beneficios reflejados para el caso específico.

1. BIOMASA

La biomasa es definida como materia orgánica producida a partir de un proceso biológico, generado de manera espontánea o provocado, y que puede utilizarse como fuente de energía. Es una de las principales fuentes de energía renovable usada en países subdesarrollados, la cual puede proveer grandes cantidades de energía incluso para reemplazar las fuentes convencionales de energía, como los combustibles fósiles. Se estima que contribuye en el orden de 10-14% del suministro energético mundial.

Está disponible de forma renovable, ya sea a través de procesos naturales, o disponible como un subproducto de las actividades humanas. La energía se almacena en enlaces químicos entre moléculas de carbono, hidrógeno y oxígeno, cuando estos se rompen por digestión, combustión o descomposición esta es liberada [1]. Se considerada una fuente de energía renovable prometedora dado sus pocos impactos ambientales en comparación a los combustibles fósiles por su bajo contenido de sulfuro y por su ciclo neutro de carbono [10].

1.1 TIPOS DE BIOMASA

1.1.1 Recursos Forestales

Son los restos procedentes de los tratamientos y aprovechamientos de las masas vegetales para defensa y mejora de éstas, se obtienen por procesos de saca, corta, transporte, etc. [11] Dichos residuos se consideran renovables, dado que en su ciclo de vida pueden ser nuevamente cultivados para reemplazar la biomasa utilizada.

La utilización de los residuos forestales implica una serie de operaciones de limpieza, astillado y transporte, que pueden superar en algunos casos los precios que el uso energético puede pagar, pero cuya realización constituye el origen de la existencia de este recurso y que se justifica desde el punto de vista medioambiental. [12]

1.1.2 Recursos Agrícolas

Son los recursos que son producidos en el campo a partir de los procesos de siembra o plantación. El proceso de generación de energía a partir de estos residuos se puede hacer mediante quema directa. Además, permiten la obtención de biocombustibles sólidos, como carbón vegetal, briquetas o pellets mediante procesos mecánicos y térmicos. [13] La gasificación no es muy recomendada para este tipo de residuos dado que se generan contaminantes como el alquitrán. [14]

1.1.3 Cultivos Energéticos

Son cultivos sembrados exclusivamente para la producción de biomasa que luego será transformable en biocombustibles, como por ejemplo cultivos productivos de azúcar y maíz para obtención de bioetanol. [15]

La principal desventaja de los cultivos energéticos es que genera una competencia directa entre la producción de alimentos y la energía por el uso de tierras para un fin diferente a la agricultura tradicional. [16]

1.1.4 Recursos Pecuarios

Son recolecciones de las deyecciones de animales que se definen como materia orgánica, este residuo es potencialmente utilizado como materia prima en la elaboración de mezclas de carga para la producción de gas, a partir de la digestión anaeróbica; a partir de estos recursos aparecen términos como biogás y biodigestor. [17]

1.1.5 Recursos Agroindustriales

Son los residuos de la unión del proceso productivo agrícola con el industrial de donde se obtienen alimentos o materias primas semielaborados.

Los residuos agroindustriales cuentan con un alto potencial para ser aprovechados en diferentes procesos que incluyen elaboración de nuevos productos, agregación de valor a productos originales y recuperación de condiciones ambientales alteradas. [18]

1.1.6 Residuos Urbanos

Son los objetos, materiales, sustancias o elementos, principalmente de tipo sólido, producto del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios. [19]

Los residuos sólidos urbanos (municipal solid waste en inglés), son considerados una fuente de energía de tipo renovable. Estos tienen la característica que son generados en gran cantidad y de manera permanente en todos los lugares del mundo, además que, si no son aprovechados para usos secundarios como, por ejemplo, generación energética, son destinados a consignarse en rellenos sanitarios u otros medios de disposición final. [8]

1.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DEL RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

De la composición típica de residuos, alrededor del 40% de los materiales son recuperables a través de la recogida selectiva y el 60% restante lo constituyen materiales que no pueden separarse de manera sencilla y tienen un alto poder energético.

Cada año en el mundo aproximadamente 130 millones de toneladas de RSU son procesadas en plantas de Residuos a Energía (RAE) logrando producir 45 GWh/año de energía. [20]

Sin embargo, el proceso de generación de energía de los residuos no es sencillo ya que el uso de los RSU directamente de la fuente se dificulta, porque se presentan condiciones de funcionamiento muy variables e incluso inestables, produciendo fluctuaciones en la calidad de los productos finales, lo cual es una consecuencia de la composición heterogénea, el diverso tamaño y forma de los residuos.

Generalmente se usan métodos de mejoramiento para homogenización y facilidad de manejo de los residuos como lo son trituración, tamizado, selección, secado y/o peletización.

Por esta razón, para lograr la generación de energía es necesario inicialmente procesar los residuos para así obtener un combustible que luego será el utilizado como entrada al sistema de generación de energía. [21]

1.2.1 Potencial de residuos en la ciudad de Bucaramanga

En el caso de Colombia, cada día se generan más de 32.000 toneladas de RSU los cuales cuentan con una composición de aproximadamente 19.000 toneladas de residuos de tipo orgánicos, representando el 60% del total. El 41% de esa generación diaria se da en las 4 ciudades más grandes del país: Bogotá (23,6 %), Cali (8 %), Medellín (7,3 %) y Barranquilla (2,1%). [2]

En la ciudad de Bucaramanga se encuentra el relleno sanitario El Carrasco en el cual actualmente se depositan los residuos sólidos urbanos de 16 municipios, que generan alrededor de 1000 toneladas de desechos al día. Estos residuos son llevados al relleno sanitario donde se hace un tratamiento, sin separación, de vertimiento, compactación y cubrimiento de los residuos. [4]

Según información de la empresa de aseo de Bucaramanga, EMAB, quienes realizaron el estudio de “Caracterización de los residuos generados en el municipio de Bucaramanga” en el año 2015, junto con investigadores ambientales del CEIAM-UIS y CAMVIHILL S.A.S. Los residuos de la ciudad se componen de: Residuos orgánicos, papel, cartón, plásticos, caucho, cuero, textiles, metales, vidrio, barreduras, jardinería y madera, sanitarios y otros residuos. Siendo otros residuos compuestos por residuos de construcción y demolición, pilas, luminarias, residuos eléctricos y electrónicos, aerosoles, medicamentos vencidos y desechos peligrosos. [22]

Con lo que pudo determinarse que, con esa composición, la ciudad tiene un potencial energético de aproximadamente 3595,1675 kcal/kg (15052,247 kJ/kg). [23]

1.3 TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Existen múltiples métodos de transformación energética de los residuos sólidos urbanos, estos se implementan dependiendo de las características químicas, físicas y biológicas de los residuos. Las dos rutas usadas principalmente para su transformación son la ruta microbiológica y la ruta termoquímica.

La ruta microbiológica es un proceso que utiliza la digestión anaeróbica en bio digestores y biorreactores para producción de biogás. Se usa generalmente en rellenos sanitarios y en parcelas orgánicas. Mientras que, la ruta termoquímica

ocurre por reacciones químicas de tipo inorgánico, con esta es posible obtener productos líquidos, sólidos y gaseosos de los residuos sólidos urbanos.

La conversión termoquímica se da mediante tres procesos que son, pirólisis, combustión y gasificación. Estos procesos a su vez se dividen según el tipo de reacción que generan, reacciones exotérmicas y reacciones endotérmicas. Las reacciones endotérmicas se dan durante la pirólisis, secado y reducción y las reacciones exotérmicas en los procesos de oxidación liberando energía, para el caso de la gasificación se produce un gas de alto poder calorífico que luego es aprovechable en combustión. [8]

1.4 GASIFICACIÓN

La gasificación puede ser definida como un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (orgánico o inorgánico) es transformado en un gas combustible mediante reacciones químicas que ocurren a altas temperaturas y en presencia de un agente gasificante. [24]



El resultado de esta transformación es un gas de síntesis con un poder calorífico de la sexta parte del poder calorífico inferior del gas natural. Este gas de síntesis normalmente está compuesto por una mezcla de CO, H₂, CO₂ y H₂O, y puede ser usado para generación de calor y energía, combustibles líquidos, productos químicos e hidrogeno. Sin embargo, es necesario realizarle un proceso de limpieza previamente para poder ser usados en turbinas de gas o motores de combustión interna ya que el gas posee propiedades ácidas y de otras impurezas que no son admitidas en estas tecnologías. [7]

Su rendimiento varía dependiendo del tipo de tecnología específica a usar, además del agente gasificante usado y de la biomasa o combustible a ingresar en el proceso, su rango puede variar del 70-80%. [25]

1.4.1 Agente Gasificante

El agente gasificante es un factor determinante para el resultado del proceso de gasificación, ya que según el agente utilizado el producto final varía en su composición y poder calorífico. Los agentes gasificantes más comunes son aire, vapor, oxígeno, CO₂ y mezcla aire-oxígeno-vapor permitiendo producir gas de alta calidad o syngas. [24]

El aire generalmente es usado por su facilidad de obtención y bajo costo, sin embargo, sus productos tienen una baja relación H₂:CO y bajo poder calorífico. El uso de oxígeno puro incrementa el poder calorífico del producto gaseoso en comparación con el aire dado su ausencia de nitrógeno, pero se requiere energía adicional para una unidad de separación de aire. Agregar vapor en el proceso de gasificación puede aumentar el rendimiento del H₂ pero de igual manera se requiere energía para su producción. Muchos otros estudios han propuesto CO₂ como agente gasificante por lo que ofrece ventajas como, alta conversión de carbono, menor potencial de corrosión comparado con el vapor y menores emisiones de CO₂. [10]

1.4.2 Tipos de gasificadores

a) Gasificadores de lecho fijo:

- *Gases de corriente descendente o downdraft*

En este tipo de reactor, la biomasa es introducida por la parte superior y el agente gasificante puede ser agregado por arriba o por los lados del equipo; dicho agente se mueve en dirección opuesta a la biomasa, es decir hacia arriba a través del lecho. [26]

La principal ventaja de este tipo de gasificador es que el gas producto, considerado relativamente limpio por su poco contenido de alquitrán, puede ser empleado casi directo en motores. Esta ventaja se obtiene debido a que el craqueo del alquitrán continúa luego que los productos pasan de la zona de reducción por el lecho de carbón. [27]

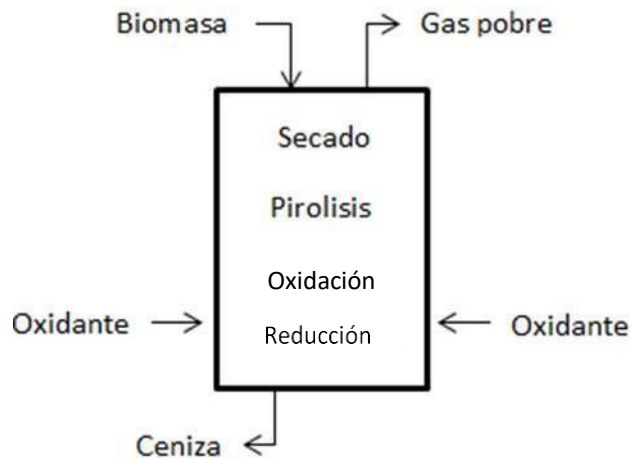


Ilustración 1 Gasificador Downdraft. Realización Propia.

- Gases de corriente ascendente o updraft

Este tipo de gasificador es el más antiguo y sencillo, es reconocido como de tiro directo o gasificador ascendente. [28] Para este tipo de gasificador la biomasa tiene un movimiento descendente mientras el agente gasificante es ascendente, permitiendo así que la biomasa sea secada por los gases calientes mientras esta va descendiendo. Después del proceso de secado, continúa en el proceso de pirolisis generando así el producto conocido como char. [29]

Los gases de pirolisis son arrastrados hacia arriba por el flujo ascendente de los gases calientes, presentando así una eficiencia térmica más elevada. [30]

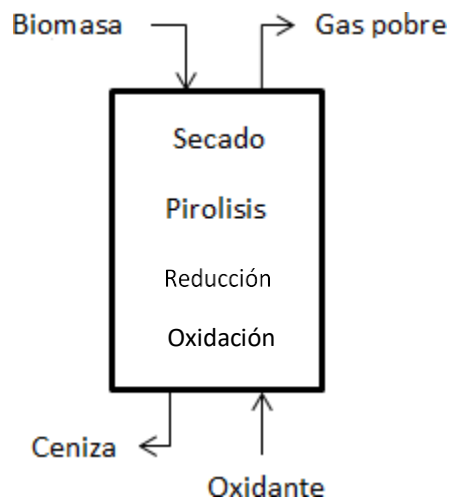


Ilustración 2 Gasificador Updraft. Realización Propia.

b) Gasificadores de lecho fluidizado:

- Gasificador Circulante

La diferencia que suponen los gasificadores de lecho fluidizado circulante, es la existencia de una tubería de retorno al reactor; como consecuencia de la recirculación, se obtienen gases de síntesis con un poder calorífico 3 veces superior al de los gasificadores convencionales. [31]

- Gasificador Burbujeante

En los gasificadores de lecho fluidizado burbujeante existe una interfase que divide la zona libre de reacción (freeboard) de la zona de reacción (lecho). Como consecuencia del mezclado, las distintas etapas de la gasificación no se distinguen. [31]

1.4.3 Etapas del proceso de gasificación

- Secado

Es la primera zona del proceso de gasificación, en esta zona la biomasa recién alimentada recibe calor que fue liberado de la zona de oxidación por las reacciones de origen exotérmico que se llevan a cabo en esta parte del reactor, en la etapa de secado la biomasa pierde su contenido de agua que es liberada en forma de vapor. La zona de secado es de origen endotérmico, la temperatura en esta zona está en un rango de 100 a 200°C [32], se produce un proceso de evaporación física, liberando agua. A medida que la temperatura va aumentando, se volatilizan los compuestos de bajo peso molecular. [33]

- Pirólisis

La pirólisis es considerada una descomposición térmica de materiales a base de carbono, como la biomasa, en una atmósfera deficiente de oxígeno y controlada [34], para obtener como producto principal combustibles sólidos, carbón vegetal, y como subproductos del proceso, líquidos, efluentes piroleñosos y gaseosos, gas pobre [35].

La pirólisis se realiza en ausencia de oxígeno, al no haber aire u oxígeno en el proceso no ocurre una quema directa generando así un proceso endotérmico que, dependiendo de la temperatura y tiempo de proceso, rinde como productos principales carbón vegetal, gases o líquidos (aceites).

Este proceso requiere de una fuente de calor externa para mantener la temperatura de operación adecuada [31]. Dependiendo de dicha temperatura y del tiempo de residencia en el reactor, se distinguen tres tipos de pirólisis [36].

Tipos de Pirólisis

- ✓ *Pirólisis lenta*: Es el proceso convencional de pirólisis. Se lleva a cabo a unos 300-550 °C y el tiempo de residencia del sólido suele ser de unos 450-550 s. La velocidad de calentamiento de la alimentación es muy lenta, por lo que se produce más cantidad de char que de bio-oil o de gas combustible.
- ✓ *Pirólisis rápida*: Es la única tecnología industrial para la producción de bio-oil, la velocidad de calentamiento del gas es mayor que la de la pirólisis lenta, al igual que la temperatura de operación (600-1000 °C). El tiempo de residencia en cambio, es mucho menor, suele ser de 0.5-10 s.
- ✓ *Pirólisis flash*: Cuando la temperatura del proceso es más elevada, alrededor de unos 1200 °C, y los tiempos de residencia son muchos más cortos, se habla de pirólisis flash. Mediante este tipo de pirólisis se quiere maximizar la producción de gas combustible.

- Oxidación o combustión

La oxidación de biomasa es un proceso de combustión en el que se obtiene dióxido de carbono y agua. Este ocurre a altas temperaturas, mayores a 800°C y utilizando aire como agente oxidante. En la oxidación en condiciones reales se emplea una cantidad de aire por encima del necesario para efectuar la oxidación total del biocombustible que se utilice en cada caso. [37]

Este proceso es de tipo exotérmico por lo que hay liberación de energía en forma de calor y se obtienen como productos el dióxido de carbono, agua, en forma de vapor, las sales minerales y pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno y de azufre, así como de monóxido de carbono, partículas de carbono y otros productos

orgánicos (hidrocarburos) resultantes de la combustión incompleta de la biomasa, denominados “inquemados”.

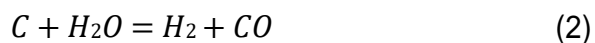
Tipos de combustión

- ✓ *Combustión completa:* En este los reactivos se queman con oxígeno produciendo un número limitado de productos, primando los óxidos más comunes como NO₂, CO₂ y SO₂. En el caso de los hidrocarburos se produce dióxido de carbono y agua. [38]
 - ✓ *Combustión neutra o estequiométrica:* Es una posición teórica en la que la cantidad óptima de oxígeno y mezcla de combustible genera la mayor cantidad de calor posible y se logra la máxima eficiencia de combustión. No hay combustibles no quemados ni aire en exceso. [39]
 - ✓ *Combustión incompleta con defecto de aire:* Se debe generalmente a una mezcla deficiente del aire y combustible, tiempo de residencia insuficiente, temperatura insuficiente y exceso de aire total bajo. La gasificación es una forma de combustión incompleta en la que se quema un combustible en una atmósfera deficiente en oxígeno formando un gas rico en energía, que consiste principalmente en metano, CO e hidrógeno. [40]
- Reducción

La reducción involucra una serie de reacciones endotérmicas que pueden darse gracias al calor producido por las reacciones de combustión existentes, las cuales transforman la biomasa a un gas combustible. Ocurre generalmente entre 600°C y 1000°C. [24]

Las 4 reacciones endotérmicas más importantes son [41]:

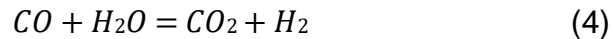
- ✓ *Reacción agua-gas:* Se refiere a la oxidación parcial del carbón por el vapor proveniente de posibles fuentes como la humedad del aire suministrado, evaporación de la humedad del sólido combustible, descomposición de la biomasa o el vapor suministrado al gasificador junto con el aire o el O₂. El vapor reacciona con el carbono de acuerdo con la reacción heterogénea



- ✓ *Reducción del CO₂*: El gas presente en el gasificador puede reaccionar con el carbono para producir CO de acuerdo a la reacción



- ✓ *Reacción water-gas shift*: La reducción del vapor por el CO es altamente deseable debido a la producción de H₂. Esta reacción incrementa la relación H₂/CO en el gas producto, por lo que a menudo es empleada en la manufactura de gas de síntesis.



- ✓ *La metanización*: el CH₄ puede formarse en el gasificador. Esta reacción puede ser acelerada por medio de catalizadores basados en Ni a temperaturas de 1100°C y presiones entre los 6 y 8 bar.



1.5 OXIDACIÓN EN DOS ETAPAS

Este proceso también llamado combustión de oxígeno controlada, es una tecnología reconocida en la disposición térmica de los residuos sólidos urbanos dada su eficiencia en recuperación de energía y bajas emisiones, especialmente de dioxinas y furanos. [42] Estas plantas son más simples y fáciles de operar que una planta convencional ya que suprime el proceso de limpieza del gas de síntesis.

Al igual que la gasificación convencional, la oxidación en dos etapas se lleva a cabo mediante los procesos de secado, pirólisis, oxidación y reducción, con la diferencia que los productos de la pirólisis son parcialmente oxidados antes del proceso de combustión. [43]

Tras la pirólisis, la tecnología se compone de dos reactores, el primero en el que los productos de la pirólisis se oxidan parcialmente con una cantidad de oxidante menor a la requerida para la combustión estequiométrica, y la segunda es una cámara de combustión donde el flujo parcialmente oxidado generado se oxida totalmente gracias a la adición de más oxidante. [7]

El proceso de reducción es una de las fortalezas de la oxidación en dos etapas ya que a su salida el flujo es mayormente gas, a excepción de una cantidad de material

particulado y cenizas que es retirado con un tratamiento leve de separación. Esta salida de gas permite que en la combustión las reacciones a ocurrir sean de tipo gas-gas, las cuales son más sencillas de manejar que las reacciones sólido-gas típicas de la gasificación convencional. Esto reduce el exceso de aire del proceso y la posible formación de llamas de premezcla, permitiendo disminuir las pérdidas de calor por lo que se incrementa la eficiencia de recuperación de energía. [7]

El agente gasificante usado generalmente es el aire dado su bajo costo y efectividad. Los parámetros que pueden afectar el uso del aire en la gasificación de los residuos sólidos urbanos son la relación de equivalencia (ER), temperatura del proceso, tiempo de residencia, la composición y propiedades de los residuos y la temperatura del aire de entrada.

Los gases de salida del proceso de oxidación en dos etapas se encuentran a temperaturas mayores a 600°C y son una mezcla de gases de CO, H₂, CO₂, CH₄, N₂ y H₂O [42]. A diferencia de la gasificación convencional, estos gases de salida no serán usados directamente para la generación de energía en motores de combustión interna o turbinas de gas por lo cual no requieren de un tratamiento de limpieza costoso y complejo.

El proceso de generación de energía se da gracias a un aprovechamiento de calor de los gases de combustión para generar potencia a través de un sistema de un ciclo Rankine o de un ciclo de combustión externa para turbinas de gas.

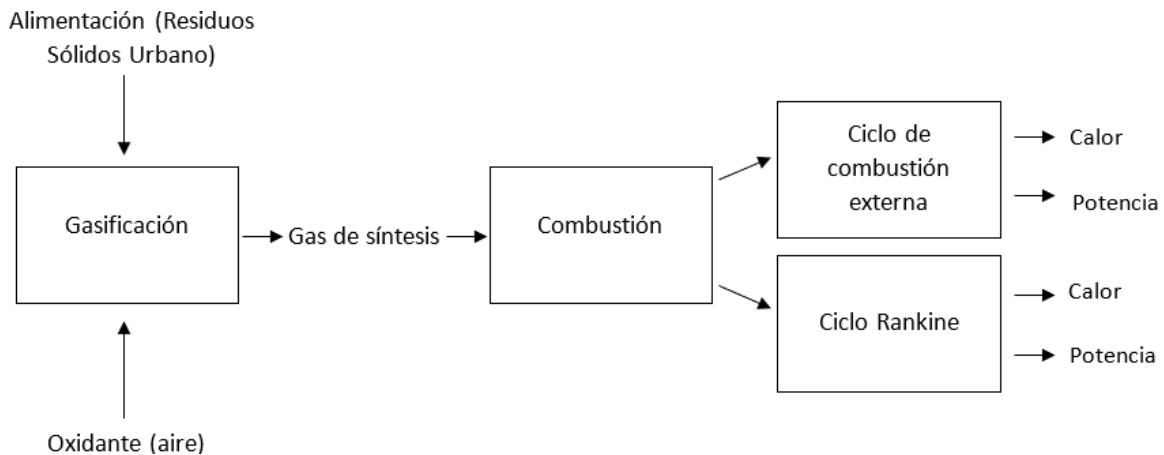


Ilustración 3 Oxidación en dos etapas. Realización Propia.

1.6 SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Aspen Plus es una de las herramientas de modelado de procesos que puede resolver problemas críticos de ingeniería y operación, como la creación del diseño del proceso, la resolución de problemas de un proceso unitario y la evaluación del rendimiento de todo el proceso. Proporciona una base de datos de propiedades, como propiedades fisicoquímicas, y un método de propiedad.

Puede manejar procesos muy complejos, como la producción de petróleo y gas, refinación química, procesamiento químico, hornos de cemento, reducción de mineral de hierro, incineradores de desechos peligrosos, gasificación de carbón, estudios ambientales, combustión de combustibles sólidos, sistemas de generación de energía, etc. El proceso implica que los componentes se mezclan, reaccionan, calientan, enfrían y separan mediante operaciones unitarias en varios procesos de estado estacionario.

Estos componentes son transportados de unidad a unidad por flujos de proceso. Las corrientes de proceso representan corrientes de material o energía. Las corrientes de material pueden expresarse por la masa, los moles y el caudal de volumen. Mientras tanto, las corrientes de energía pueden ser representado por trabajo o tasa de flujo de calor. Los flujos de materiales se dividen en tres tipos: mixtos, sólidos y no convencionales (para materiales como carbón, biomasa y residuos sólidos municipales (RSU)). Los componentes no convencionales están bien definidos al proporcionar la composición elemental (análisis final y próximo) y la entalpía estándar de formación. [10]

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el potencial de generación de energía a partir de la oxidación en dos etapas con residuos sólidos urbanos de la ciudad de Bucaramanga.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar el contenido energético de los RSU de la ciudad de Bucaramanga a partir de la composición Fisicoquímica
2. Realizar el montaje de la tecnología oxidación de dos etapas en un software de simulación para la generación de gas de síntesis
3. Realizar el montaje de un sistema de generación de energía mediante ciclo Rankine en una herramienta de cálculo
4. Identificar las condiciones de funcionamiento que generen menor impacto ambiental para una cantidad de residuos establecida
5. Determinar la generación de energía a partir de los RSU con la tecnología

3 METODOLOGÍA

El proyecto se encuentra planeado con el objetivo de analizar una propuesta para la problemática de disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos de la ciudad de Bucaramanga, dispuestos en el relleno sanitario conocido con el nombre “El Carrasco”. Este se llevó a cabo con el desarrollo de tres fases, tal como se expone a continuación:

3.1 FASE I

Dentro de la primera etapa del proyecto se realizó un análisis de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Bucaramanga, mediante una caracterización, lo cual se llevó a cabo con las siguientes actividades:

- Levantamiento de información de la composición física
- Búsqueda en bibliografía de composición química teórica de los RSU
- Determinación del análisis próximo y último de los residuos
- Determinación del poder calorífico de los residuos

Una vez conocidas las características de los residuos, se hizo un estudio bibliográfico de las diferentes tecnologías para el tratamiento de los RSU con el propósito de generación de energía, entre ellas incineración y gasificación convencional, permitiendo establecer cuál podría ser la tecnología más adecuada para las condiciones de los desechos sólidos urbanos provenientes del Carrasco. Para este caso se propuso la “oxidación en dos etapas”.

3.2 FASE II

Durante la fase dos del proyecto se realizó una revisión bibliográfica del funcionamiento y parámetros de cada una de las etapas del proceso de la oxidación en dos etapas, con el propósito de establecer condiciones de funcionamiento que permitieran y pudieran adaptarse el tipo de tecnología. Esta recopilación de información fue utilizada en la fase 3 para desarrollar la simulación del proceso.

Además, se hizo una comparación de los distintos equipos de gasificación con el propósito de escoger cual era el tipo de gasificador más conveniente a usar para la

simulación oxidación en dos etapas. El mismo proceso se desarrolló para la elección del agente gasificante del sistema, ya que, por medio de investigación en literatura se hizo un reconocimiento de los agentes gasificantes que podían ser utilizados durante el proceso y sus beneficios.

Luego, se estableció la estructura del diagrama del proceso con sus entradas e interacciones con el medio que luego sería replicado en el desarrollo de la simulación.

Finalmente, se lleva a cabo el proceso de generación de energía el cual se lleva a cabo gracias a la determinación del calor entregado al fluido de trabajo del ciclo Rankine, mediante el análisis Pinch, y a la determinación de las condiciones termodinámicas del propio ciclo.

3.3 FASE III

El desarrollo de la fase 3 fue principalmente ejecutado en el simulador ASPEN PLUS, donde con condiciones de temperatura, presión, análisis último, próximo, análisis de sulfuro, entre otros parámetros, de los residuos sólidos urbanos, se logró plantear el funcionamiento básico de la tecnología para la obtención de resultados. Dichas condiciones son exigidas por el software para que el proceso sea lo más acertado posible.

En el software se plantea cada una de las etapas de la gasificación, en forma de bloques de proceso, con sus respectivas condiciones, en el siguiente orden:

1. Secado
2. Pirolisis
3. Reducción
4. Oxidación

Además, se usan algunas herramientas extra que facilitan la simulación del proceso, como lo son las calculadoras de procesos, las cuales permiten escribir en el lenguaje Fortran las ecuaciones por las que se regían ciertos procesos en los equipos.

Las actividades que debieron llevarse a cabo para obtener los resultados del proceso son las siguientes:

- Establecer las reacciones químicas principales que pudieran ocurrir en la gasificación para identificar los componentes que se encontraran en los gases de salida
- Determinar el aire teórico y real de entrada al proceso usado para lograr la combustión completa de los residuos a partir de los diferentes valores de relación de equivalencia
- Ingreso de condiciones en el software y variación de parámetros para iniciar análisis de resultados y determinar la mejor condición del proceso, en este punto se determina la mejor condición para procesos como la pirolisis, que aseguren valores reducidos de contaminantes.
- Estimación del poder calorífico y calor liberado por los gases de combustión, además del calor aprovechado por el agua en el ciclo Rankine, mediante un análisis pinch.

La siguiente parte del sistema se desarrolla en la herramienta de cálculo EES (Engineering Equation Solver), donde a través del comportamiento termodinámico del ciclo Rankine y condiciones reales de funcionamiento de equipos del ciclo se obtienen los resultados de generación de energía.

Las actividades finales desarrolladas para la obtención de los resultados fueron:

- Determinar la eficiencia de la gasificación mediante los valores energéticos de poder calorífico de los gases de salida y la eficiencia del ciclo Rankine según consumo y producción de trabajo
- Estimación de la generación anual de energía eléctrica
- Determinación y análisis de los componentes presentes en el gas de síntesis a la salida de la reducción y de los gases de la oxidación a la salida de la cámara de combustión
- Determinación de la producción de emisiones contaminantes según tiempo de funcionamiento

4 DESARROLLO

4.1 FASE I: CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

4.1.1 Composición Física de los RSU de Bucaramanga

La composición química y física de los residuos sólidos urbanos son factores fundamentales para el estudio de la recuperación y tratamiento final de la biomasa.

Para analizar los residuos provenientes de los desechos de la ciudad de Bucaramanga se requirió inicialmente determinar la composición física de estos. Con esta composición fue posible conocer los componentes individuales que constituyen el flujo de residuos sólidos y su distribución relativa basada en porcentaje de peso. Esta información fue obtenida del estudio publicado por la EMAB y realizado por la Universidad Industrial de Santander y CAMVILL.S.A.S. “Caracterización de los residuos generados en el municipio de Bucaramanga” en el año 2015.

Para la caracterización se recolectaron cinco muestras de residuos sólidos urbanos de 5 diferentes camiones de basura que se encontraban en el Carrasco en el mismo momento, esto para evitar cambios en sus condiciones. Cada muestra compuesta por 20 kilos. Posteriormente, con estas muestras se utilizó el método del cuarteo con el objetivo de obtener muestras homogéneas y representativas de los diferentes tipos de residuos.

Para lograr esto se tomaron las muestras mencionadas anteriormente y se depositaron sobre un área plana horizontal de 4 metros por 4 metros, formando una única pila o montón de basura.

Esta pila de residuos sólidos urbanos se mezcla hasta homogeneizarlos, y posteriormente se dividen en cuatro partes iguales A, B, C, D. Tras la separación se eliminan dos muestras de partes opuestas, A y C o B y D. Esta operación se repite hasta dejar un mínimo de 50 Kg de muestra, en la ilustración 4 se ve gráficamente un ejemplo del proceso lo mencionado.

De las partes eliminadas del primer cuarteo se toman 10 kg, para análisis físicos, químicos y biológicos, y con el resto se determina el peso volumétrico.

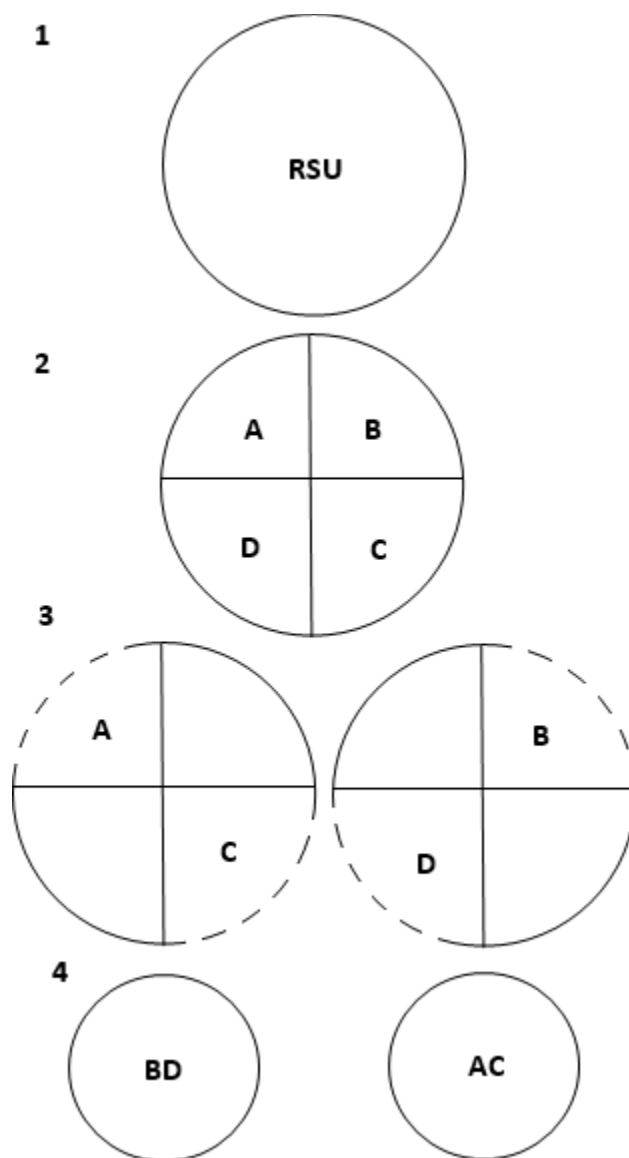


Ilustración 4 Método de cuarteo. Realización Propia.

Los resultados exponen un total de 33 tipos de residuos que, para facilitar su análisis, son condensados en 20 tipos, como son; residuos orgánicos, papel, poda y jardinería, cartón, PET, PEAD, PVC, PEBD, PS, otros plásticos, caucho y neumáticos, cuero, textiles, madera, metales, vidrio, residuos sanitarios, barreduras, huesos y otros residuos. Estos últimos compuestos por Residuos RCD (Residuos de construcción y demolición), pilas, luminarias RAES (Residuos eléctricos y electrónicos), aerosoles, medicamentos vencidos y RESPEL (Desechos peligrosos).

Con la caracterización se estima que en total se tiene una disposición de 163.539 ton/año de este tipo de residuos. Además, de los porcentajes que representa cada residuo en esa cantidad, valor requerido para determinar su composición química.

4.1.2 Composición Química de los RSU de Bucaramanga

La composición química se realiza para determinar los elementos de la tabla periódica de los cuales se componen los residuos del proceso. Para lo cual, es necesario determinar el análisis último, donde se identifica el porcentaje de carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno, cloro, azufre y cenizas en la muestra y el análisis próximo, para conocer el porcentaje del carbón fijo, volátiles, y ceniza.

El proceso se llevó a cabo tabulando los porcentajes de los componentes de los análisis para cada tipo de residuo, además, de los porcentajes de representación de estos.

Posteriormente se realizó una media ponderada entre, los porcentajes de los componentes del análisis próximo y último de cada uno de los residuos encontrados en la composición física por su porcentaje de representación dentro del total de los residuos. Como se muestra en las ecuaciones:

Análisis Último:

$$\%C = \frac{\%C_{R1} * \%R1 + \%C_{R2} * \%R2 + \dots + \%C_{R20} * \%R20}{\%R1 + \%R2 + \dots + \%R20} \quad (6)$$

$$\%H = \frac{\%H_{R1} * \%R1 + \%H_{R2} * \%R2 + \dots + \%H_{R20} * \%R20}{\%R1 + \%R2 + \dots + \%R20} \quad (7)$$

$$\%O = \frac{\%O_{R1} * \%R1 + \%O_{R2} * \%R2 + \dots + \%O_{R20} * \%R20}{\%R1 + \%R2 + \dots + \%R20} \quad (8)$$

$$\%N = \frac{\%N_{R1} * \%R1 + \%N_{R2} * \%R2 + \dots + \%N_{R20} * \%R20}{\%R1 + \%R2 + \dots + \%R20} \quad (9)$$

$$\%S = \frac{\%S_{R1} * \%R1 + \%S_{R2} * \%R2 + \dots + \%S_{R20} * \%R20}{\%R1 + \%R2 + \dots + \%R20} \quad (10)$$

$$\%Cl = \frac{\%Cl_{R1} * \%R1 + \%Cl_{R2} * \%R2 + \dots + \%Cl_{R20} * \%R20}{\%R1 + \%R2 + \dots + \%R20} \quad (11)$$

$$\%Ash = \frac{\%Ash_{R1} * \%R1 + \%Ash_{R2} * \%R2 + \dots + \%Ash_{R20} * \%R20}{\%R1 + \%R2 + \dots + \%R20} \quad (12)$$

Análisis Próximo:

$$\%FC = \frac{\%FC_{R1} * \%R1 + \%FC_{R2} * \%R2 + \dots + \%FC_{R20} * \%R20}{\%R1 + \%R2 + \dots + \%R20} \quad (13)$$

$$\%V = \frac{\%V_{R1} * \%R1 + \%V_{R2} * \%R2 + \dots + \%V_{R20} * \%R20}{\%R1 + \%R2 + \dots + \%R20} \quad (14)$$

En ambos casos, los porcentajes de los componentes de los análisis fueron tomados de bibliografía. [44]

4.1.3 Cálculo del Poder Calorífico

Finalmente, se determinó el poder calorífico inferior de los residuos del estudio. Este cálculo se realizó en base seca a través del método analítico, con la fórmula de Dulong.

$$PCI \left[\frac{Kcal}{Kg} \right] = 8.140 * C + 29.000 * \left[H - \left(\frac{O}{8} \right) \right] + 2.220 * S \quad (15)$$

Este proceso se realizó para comparar los resultados con el valor de poder calorífico obtenido en el estudio “Caracterización de los residuos generados en el municipio de Bucaramanga”, el cual se halló de manera experimental.

4.1.4 Selección de oxidación en dos etapas

Para hacer la selección de la tecnología se tuvieron en cuenta cuatro (4) características, de los diferentes métodos de aprovechamiento energético, que se consideraron importantes para la implementación de la tecnología en el contexto especificado anteriormente.

Las características seleccionadas fueron:

1. Tolerancia de la alimentación primaria
2. Emisiones generadas durante el proceso
3. Eficiencia del proceso
4. Costos de implementación de la tecnología

La tecnología escogida fue la oxidación en dos etapas dado su desempeño comparado con las demás tecnologías en los aspectos planteados.

Al analizar su comportamiento con las diferentes entradas de alimentación primaria al sistema, se encuentra que la oxidación en dos etapas posee mayores rangos de alimentaciones admisibles que un gasificador convencional. Los gasificadores convencionales son muy sensibles a las variaciones en las composiciones, humedad, contenido de ceniza, reactividad, etc. Mientras que, la oxidación en dos etapas se considera ideal para los residuos sólidos urbanos.

La flexibilidad de su alimentación es tan amplia, que en algunos casos no requiere la separación de los residuos antes de su ingreso, punto importante para la selección de la tecnología dado que en la ciudad de Bucaramanga no se hace este proceso.

En el caso de la generación de emisiones contaminante, esta es una de las principales fortalezas de la tecnología. Si se desarrolla a condiciones apropiadas, se evita la generación de furanos y dioxinas o se eliminan estos componentes si ya se encuentran en los residuos. Dada su combustión completa también se reduce la producción de gases como CO. En cuanto a material inerte o no combustible, estos son recogidos en la parte baja del gasificador. En los gases de combustión puede encontrarse pequeñas cantidades de ceniza o volátiles que se retienen mediante procesos de filtrado de material particulado.

El proceso se considera eficiente ya que en la combustión se producen reacciones homogéneas, es decir tiene un comportamiento gas-gas, ya que solo intervienen reactivos en fase gas, los cuales son el gas de síntesis y el aire, a diferencia de la gasificación convencional donde las reacciones son heterogéneas, es decir, su comportamiento es sólido-gas, ya que los reactivos del caso son los productos de la pirólisis (sólidos, líquidos o gas) y el aire. Las reacciones heterogéneas hacen que el rompimiento de las moléculas sea de mayor dificultad e incluso generen mayor cantidad de contaminantes

Las reacciones homogéneas facilitan el control de la combustión, mediante la reducción del exceso de aire y disminución de formación de llamas de premezcla, lo que reduce las pérdidas de calor y aumentando la eficiencia de la recuperación de calor.

Finalmente se considera una tecnología menos costosa que la gasificación convencional dado que para la generación de potencia no se requiere de sistemas de limpieza o purificación estrictos que aumentan el costo inicial y de operación del sistema.

4.2 FASE II: PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Tras analizar la información recolectada en la revisión bibliográfica, se identificó que el gasificador que debe usarse en sistemas de gasificación en dos etapas es de tipo updraft, también conocido como “contracorriente”. Esta selección se da debido a el orden en que se distribuyen las cuatro (4) etapas del proceso dentro del gasificador, que concuerda con el orden de la tecnología. Secado, pirólisis, reducción y oxidación.

También se definió el aire como agente gasificante a usar para el proceso, esto dado que para este caso no se requiere que el gas de síntesis producto de la combustión tenga un poder calorífico alto, además, porque el aire resulta efectivo [7] y es de bajo costo. Mientras que, en caso de requerirse un gas con poder calorífico alto se deberán utilizar agentes gasificantes como, hidrógeno o vapor, los cuales son costosos.

El siguiente paso fue determinar el rango de condiciones a las que debía ocurrir cada una de las etapas del proceso. Para esto se recopilaron datos y se realizaron consultas, con las que se obtuvieron parámetros de temperatura y presión principalmente que permitían verificar si el proceso en el software se realiza a condiciones cercanas a las reales de funcionamiento.

4.2.1 Zona de Secado

Uno de los parámetros más importantes en esta zona es el porcentaje de humedad a retirar de la biomasa de alimentación. Teniendo en cuenta que para este tipo de biomosas, la humedad requerida para el proceso de gasificación debe estar en el rango de 10-15%. [45]

También, se determinó el método de secado a utilizar, el cual es mediante aire caliente. La reducción de la humedad se logra gracias al flujo de aire de entrada al proceso y su temperatura. El rango de temperatura típico para llevar a cabo este proceso está entre 100 a 200°C y el flujo de aire a ingresar depende de la relación de equivalencia para el caso seleccionado.

Para establecer la cantidad de aire de entrada al proceso, primero se determina la relación de aire-combustible teórica para una combustión completa, lo cual se realizó con un balance ideal de la combustión de los RSU que ingresan al proceso, por medio del software EES, donde se hallan los moles de aire teóricos.

La relación de aire combustible se determina mediante la ecuación 16.

$$\frac{A}{Cteórica} \left[\frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ combustible}} \right] = \frac{\text{aireteórico [kmol]} * \text{moles aire [kmol]} * \text{peso molecular aire} \frac{kg}{kmol}}{\text{masa de combustible [kg]}} \quad (16)$$

Teniendo en cuenta lo anterior el valor obtenido es de 5,701 $\left[\frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ combustible}} \right]$

Posteriormente, se determina la cantidad total de aire dependiendo del flujo de residuos a ingresar, para este proyecto se decide una cantidad de residuos estática definida en 100 kg/h, dado que es un valor coherente con bibliografía. [8] Sin embargo, en el proceso de secado no ingresa el total del aire sino el determinado a partir de la relación de equivalencia del proceso de gasificación, ya que el aire ingresado al secado es el mismo que ingresará a la reducción. La RE es la relación entre el aire actual suministrado para oxidación parcial y el aire estequiométrico, como se indica en la ecuación 17.

$$RE = \frac{A/CReal}{A/Teórico} \quad (17)$$

Los valores de relación de equivalencia para estos procesos varia de 0,2 a 0,4 aproximadamente, siendo estos los rangos usados en el presente estudio. Por lo que finalmente, la determinación del flujo se hace mediante la relación aire combustible real y el flujo de residuos establecidos. Lo cual se aprecia en la ecuación 18.

$$\text{Aire} \left[\frac{kg}{h} \right] = \frac{A}{Cteórica} \left[\frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ combustible}} \right] * RE * RSU \left[\frac{kg}{h} \right] \quad (18)$$

El último parámetro establecido en el sistema es la presión, que para este y todos los demás procesos del sistema se determina como presión atmosférica.

4.2.2 Zona de Pirolisis

Como se indicó anteriormente, la pirolisis se divide en varios tipos según las condiciones de funcionamiento. Para escoger cual sería el tipo adecuado a utilizar en este proceso se compararon dos condiciones de temperatura de pirólisis: la primera es una condición de pirólisis lenta que debe estar dentro del rango de los 300 - 550°C, la segunda condición es de pirólisis rápida que varía entre los 600-1000°C.

Al obtener los resultados se escogerá la condición en la que la generación de cenizas sea la menor, lográndose obtener mayor cantidad de material sólido aprovechable en la reducción.

4.2.3 Zona de reducción

En esta zona los parámetros principales que afectan su comportamiento son el flujo de aire de ingreso que se determinó anteriormente en el proceso de secado y las reacciones químicas ocurridas en el interior del reactor, las cuales dependen del calor proporcionado al proceso proveniente de la combustión. Como se indicó en la sección 1.3 de este documento la reducción es de carácter endotérmico mientras que la combustión es exotérmica y su calor es aprovechado en los demás procesos.

El control de la temperatura de proceso de la reducción es un punto importante para el análisis de generación de agentes contaminantes, en especial de dioxinas. Las dioxinas se generan principalmente a partir del HCl, por lo que su porcentaje de emisión va relacionada con la producción de este último. Se considera que para obtener una reducción de su producción el proceso de reducción debe limitarse a temperaturas inferiores de 650°C [46], valor que se controla con la entrada de aire a este proceso.

En esta zona se deben definir las reacciones químicas que ocurrirían en el proceso a partir de los productos de la pirólisis. En la tabla 1 se presentan las reacciones principales ocurridas en los gasificadores:

Tabla 1 Reacciones de la reducción y oxidación. Realización Propia

REACCIONES	TIPO DE REACCION
$C + O_2 \longrightarrow CO_2$	Combustión de carbono
$C + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO$	Combustión de carbono
$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$	Reacción Agua-Gas
$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$	Reacción Bourdourd
$C + 2H_2 \longrightarrow CH_4$	Metanización
$S + H_2 \rightleftharpoons H_2S$	Hidrogenación del azufre
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow H_2O$	Oxidación del hidrogeno
$CO + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow CO_2$	Oxidación del monóxido de Carbono
$CH_4 + 2O_2 \rightleftharpoons CO_2 + 2H_2O$	Oxidación completa

$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \begin{array}{c} \longrightarrow \\ \longleftarrow \end{array} \text{CO}_2 + \text{H}_2$	Reacción agua-gas shift
$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	Reformación por vapor
$\text{CO} + 3\text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	Metanización
$\text{CH}_4 + \frac{3}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	Oxidación del metano

4.2.4 Zona de Oxidación:

En la zona de oxidación ocurrirá la combustión completa de los reactivos, por lo cual los parámetros determinantes para su correcto funcionamiento son: la entrada de aire y las reacciones resultantes.

La cantidad de aire que debe ingresar debe ser una cantidad superior a la estequiométrica hallada anteriormente dado que se desea asegurar la combustión completa de todos los componentes producto de la reducción. Las reacciones ocurridas en este proceso se establecen como las mismas de la reducción, ya que, se llevan a cabo en diferente medida dadas las diferentes condiciones de ambos procesos, generando a su vez diferentes productos.

Al igual que en la reducción, la producción de dioxinas en la oxidación es un ítem importante también dependiente de la temperatura. En este caso, se considera que si el proceso ocurre a una temperatura superior a 650° se limita la producción de HCL [46], valor que se alcanza mediante el control de las reacciones ocurridas en el reactor.

4.2.5 Análisis Pinch

Tras la salida de los gases de la combustión a altas temperaturas el proceso se traslada al siguiente proceso, el intercambio de calor. En aspen plus se obtiene el valor del calor que pueden transferir los gases, sin embargo, para conocer el calor que llega realmente al fluido del ciclo Rankine se opta por realizarse un análisis pinch.

Este es un análisis termodinámico que tiene en cuenta el cambio de las entalpías en las corrientes que pasan por un intercambiador de calor [47]. En este se determina un acercamiento de temperatura mínima entre la corriente caliente, en este caso los gases de combustión, y la corriente fría, el agua. Este acercamiento

se representa mediante un ΔT que permite conocer la mínima temperatura a la que puede descender la corriente caliente y la máxima a la que puede ascender la fría, con lo que se determina el calor máximo transferido entre las corrientes, acorde con la segunda ley de la termodinámica. En el punto de acercamiento el calor liberado por la corriente caliente es igual al recibido por la corriente fría.

El proceso ocurre como se indica en la ilustración 5, en donde la primera línea indica el descenso de la temperatura de los gases de combustión y la segunda el aumento de temperatura del agua a presión constante.

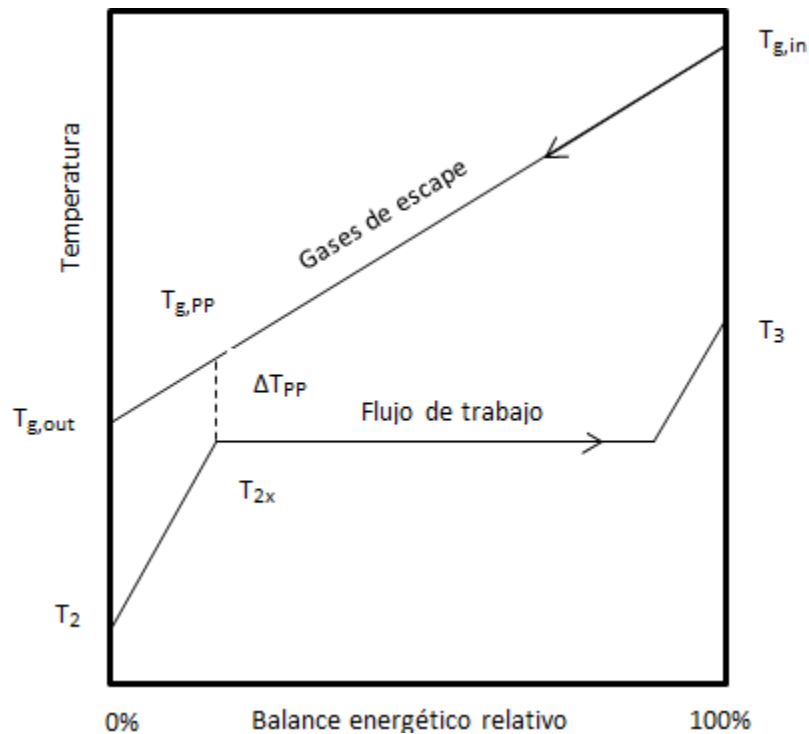


Ilustración 5 Diagrama de Análisis Pinch. Realización propia

Para el caso específico del presente trabajo se define el parámetro de temperatura de salida de los gases de combustión, esta temperatura se define en 200°C, ya que a esta condición se asegura que no se condensen los diferentes componentes de los gases.

4.2.6 Ciclo Rankine

El ciclo Rankine se plantea como el medio de aprovechamiento de los gases de salida de la gasificación en dos etapas. En el sistema desarrollado se plantea que

el equipo de generación de vapor sea un intercambiador de calor en vez de una caldera, donde los gases de combustión de la gasificación, que se encuentran a altas temperaturas, transfieran su calor al agua del ciclo. El vapor producido será usado para generación de trabajo en una turbina.

El ciclo Rankine real se compone de 4 etapas que son representadas en el diagrama termodinámico T-S de la ilustración 6.

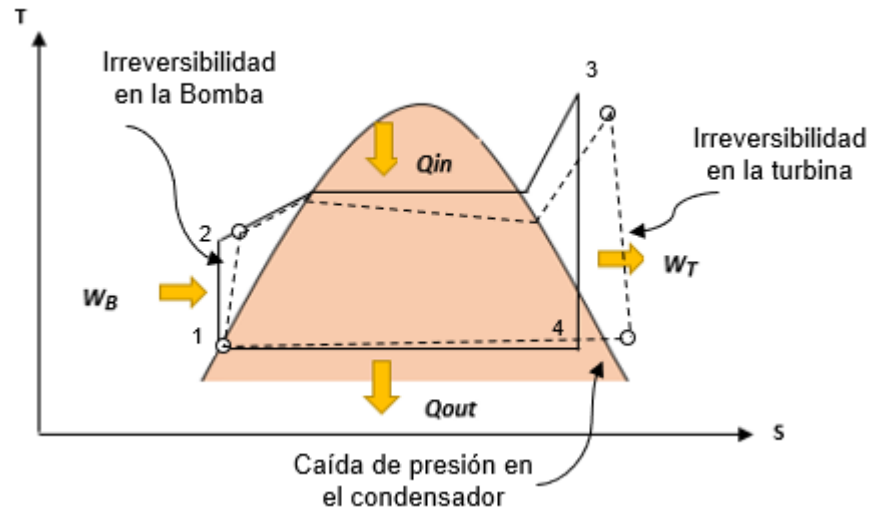


Ilustración 6 Termodinámica del Ciclo Rankine. Realización Propia

Las etapas reales se desarrollan de la siguiente manera:

- Proceso 1-2: Compresión del fluido de trabajo en fase líquida mediante una bomba, lo cual implica un consumo de potencia. Se aumenta la presión del fluido de trabajo hasta el valor de presión en el intercambiador.
- Proceso 2-3: Transmisión de calor hacia el fluido de trabajo a presión constante en el intercambiador de calor. En un primer tramo del proceso el fluido de trabajo se calienta hasta la temperatura de saturación, luego tiene lugar el cambio de fase líquido-vapor y finalmente se obtiene vapor saturado.
- Proceso 3-4: Expansión del fluido de trabajo en la turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador. Se realiza en una turbina de vapor o una máquina de vapor reciprocante en las cuales se genera potencia en el eje de las mismas.
- Proceso 4-1: Transmisión de calor a presión constante desde el fluido de trabajo hacia el circuito de refrigeración, de forma que el fluido de trabajo alcanza el estado de líquido saturado. Se realiza en un condensador (intercambiador de calor), idealmente sin pérdidas de carga, el calor rechazado puede utilizarse en la mayoría de los procesos para otros usos tecnológicos.

4.3 FASE III: SIMULACIÓN DEL PROCESO

Para realizar la simulación se escogió el software Aspen Plus, dado su capacidad para describir en detalle el tipo de sólidos, además, de proveer una librería especializada para los procesos con alimentaciones sólidas.

Este software especializado facilita la realización de cálculos, permite añadir variables y da la posibilidad de realizar análisis de resultados precisos de la aplicación de residuos sólidos urbanos como una fuente de energía alternativa.

Para simular el sistema, algunos supuestos son aplicados de modo a hacer más fácil el análisis de los procesos:

- Todos los procesos de la gasificación ocurren en estado estable, en donde la presión es uniforme y no hay pérdidas de calor;
- Las reacciones de la gasificación se llevan a cabo instantáneamente y alcanzan el estado estable rápidamente;
- Todos los gases son gases ideales;
- La influencia del alquitrán no se considera;
- Todas las mezclas son perfectas y la distribución de la temperatura es uniforme en cada proceso;
- El efecto del tamaño de las partículas en el gasificador se ignora;
- La mayor cantidad del carbono se transforma en fase gas y el resto se transforma en carbono residual en el fondo del sistema.

Para iniciar la simulación se indica el uso de sólidos mediante una plantilla de procesos de este tipo. A continuación, se definen los componen de las diferentes alimentaciones que ingresarían al proceso. En el caso de los residuos sólidos urbanos, como son sólidos heterogéneos que no tienen un peso molecular definido, estos se definen como compuestos No Convencionales.

Los compuestos no convencionales requieren detallar sus composiciones químicas, por lo cual es necesario el ingreso de los valores hallados en la caracterización, como lo son:

- Análisis Próximo
- Análisis Último
- Análisis de sulfuro

El análisis de sulfuro, indica la cantidad de azufre presente en la muestra.

Durante la simulación se utilizaron componentes especiales del software Aspen plus para llevar a cabo cada uno de los procesos. Entre los que se encuentran, calculadores, bloques de proceso, corrientes de masa, calor y trabajo.

Los bloques son las representaciones gráficas de cada uno de los procesos. Dentro de estos se definen las condiciones de trabajo, temperaturas, presiones o potencia del proceso. Las calculadoras, que funcionan mediante lenguaje FORTRAN, se utilizan para desarrollar cálculos científicos.

4.3.1 Gasificación en dos etapas

✓ *Modelo de gasificación a replicar*

Primero, se planteó el modelo a replicar en Aspen Plus, donde se evidencian los procesos principales de secado, pirólisis, reducción y oxidación, con las correspondientes entradas y salidas de componentes que intervienen en el proceso. Ese modelo se presenta en ilustración 7.

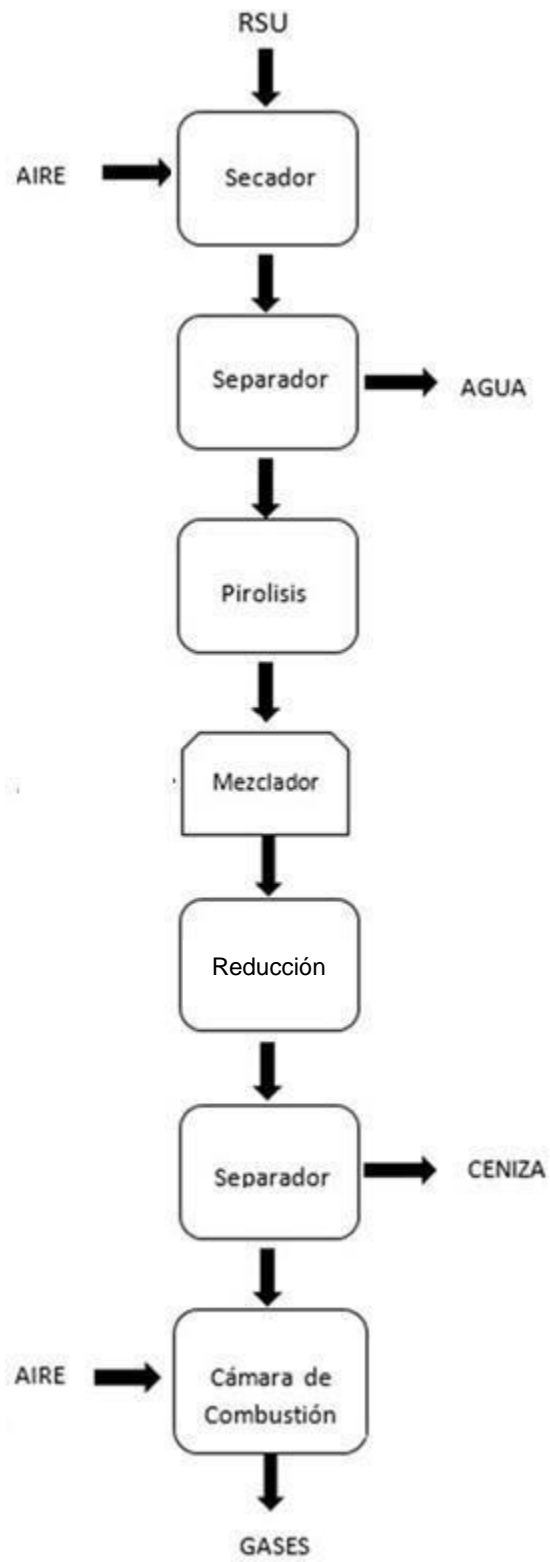


Ilustración 7 Diagrama del proceso simulado. Realización propia. Fuente: Syngas from Waste, Emerging Technologies

✓ **Definición de compuestos que intervienen**

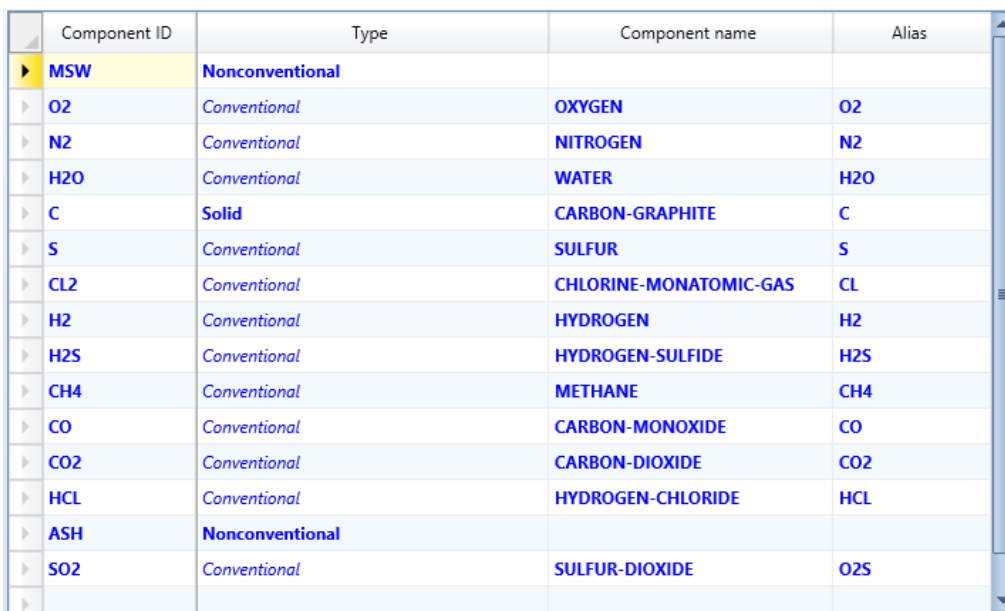
Se define la entrada principal como residuos sólidos urbanos indicados como un único componente (MSW). A este se le da condiciones de composición según los resultados de análisis próximo, análisis último y análisis de sulfuro.

También, se definen los demás parámetros que intervienen en el proceso, como:

- Agente gasificante
- Compuestos de la descomposición de los RSU
- Reacciones de reducción y oxidación
- Ceniza, como residuos del proceso

En cada uno de estos se selecciona el tipo de componente. Los residuos y la ceniza al ser productos heterogéneos con composiciones que deben definirse se consideran No Convencionales. Los demás elementos, menos el carbono, se seleccionan como Convencionales, ya que son productos con composiciones definidas en la base de datos del software. Para el caso del carbono, se escoge como componente Solido, lo que significa que cualquier carbono que se forme estará presente como una fase sólida pura, no como una solución sólida o aleación.

En la ilustración 8 se muestra cómo se identificaron en el software los componentes:



Component ID	Type	Component name	Alias
MSW	Nonconventional		
O2	Conventional	OXYGEN	O2
N2	Conventional	NITROGEN	N2
H2O	Conventional	WATER	H2O
C	Solid	CARBON-GRAPHITE	C
S	Conventional	SULFUR	S
CL2	Conventional	CHLORINE-MONATOMIC-GAS	CL
H2	Conventional	HYDROGEN	H2
H2S	Conventional	HYDROGEN-SULFIDE	H2S
CH4	Conventional	METHANE	CH4
CO	Conventional	CARBON-MONOXIDE	CO
CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
HCL	Conventional	HYDROGEN-CHLORIDE	HCL
ASH	Nonconventional		
SO2	Conventional	SULFUR-DIOXIDE	O2S

Ilustración 8 Compuestos que intervienen en el proceso. Fuente: Aspen Plus

✓ **Proceso de Secado de los RSU**

La primera etapa simulada fue el proceso de secado de los residuos sólidos. Se contempló que este tipo residuos poseían una humedad del 30% por lo cual debió

reducirse este porcentaje hasta lograr valores en el rango de 10-15% Este proceso se llevó a cabo en un reactor Rstoic de tipo estequiométrico (simulando un reactor de lecho fijo), utilizado para evaporar la humedad, y un bloque de calculadora donde se definió, mediante ecuaciones, la conversión del agua en vapor.

Para llevar a cabo la disminución de humedad se usa una entrada de aire a la temperatura promedio de Bucaramanga, 26°C, que es calentada en un calentador. Como el flujo de entrada del aire se define por el RE, el parámetro que varía la humedad es la temperatura, según se modifique este valor por el calor del proceso, la humedad aumentará o disminuirá en los residuos que ingresan a la pirolisis.

En la tabla 2 se presentan las entradas de aire en el secado según la relación de equivalencia de cada caso.

Tabla 2 Flujo másico de aire en el secado. Realización Propia

Relación de equivalencia	Flujo másico de entrada a gasificador [kg/h]
0,2	114,02
0,24	136,824
0,8	159,628
0,32	182,432
0,36	205,236
0,4	228,04

Como se indicó anteriormente, la presión en todo el sistema se establece como atmosférica, siendo de 0,8947 atm para la ciudad de Bucaramanga.

A la entrada del reactor se definen entonces 2 corrientes. La primera los residuos (RSU) con las condiciones de composición mencionadas anteriormente, además de temperatura de 26°C y 0,8947 atm. La segunda es la corriente de aire caliente (asumiendo comportamiento de aire seco).

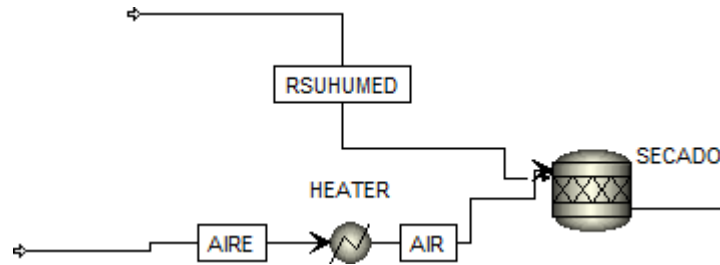


Ilustración 9 Proceso de secado. Fuente: Aspen Plus

Para cada una de las RE usadas se cumplió el parámetro de humedad para entrada a la pirólisis, con valores de 11,03% hasta el 15,20% de humedad.

Dado que en el software el reactor no puede realizar el proceso de separación de las fases, se debe agregar un nuevo bloque que permita retirar productos no requeridos para pirólisis, como lo son el aire y el vapor.

Para esto usa un separador Flash. Este, es un equipo que simula la separación de los productos que se encuentran en fase vapor.

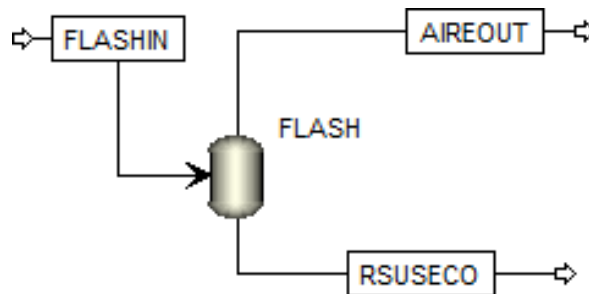


Ilustración 10 Proceso Flash. Fuente: Aspen Plus

Una de las salidas de este proceso son el vapor del agua evaporada de los residuos y el aire de secado en una corriente que posteriormente será reingresada a la reducción. La otra salida son los residuos sólidos urbanos con su respectiva humedad restante, que continuarán a la siguiente fase de la pirólisis. Tras este proceso los residuos experimentan un aumento de temperatura.

✓ **Proceso de Pirólisis**

Para modelar el siguiente proceso en el software requiere de dos sistemas, en los que ocurre la descomposición y las reacciones de pirólisis.

El proceso de descomposición de los residuos sólidos urbanos debe realizarse ya que, como se indicó en la sección 4.3.1.2, la entrada de los residuos al sistema se hace mediante una única corriente llamada MSW que al ser un componente no convencional no se permite que se desarrollen reacciones, por lo que se requiere que se descomponga en sus componentes básicos del análisis próximo (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, cloro y azufre).

El segundo sistema es donde se desarrolla el proceso real de pirolisis, en este ocurre un rompimiento térmico de largas cadenas de hidrocarburos para convertirlas en pequeñas moléculas de gas.

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



Los resultados se dividen en tres clases [48]:

- Gases: Estos gases son compuestos como el O₂, N₂, H₂, etc.
- Sólidos: Es la parte sólida liberada por el combustible (CHAR) en conjunto con la ceniza del combustible (ASH).
- Líquidos: TAR (alquitranes), hidrocarburos pesados y agua

Este proceso se llevó a cabo en un reactor Ryield, el cual realiza una distribución de productos cuando se especifican los componentes de ingreso, y en un Rgibbs donde a través del que se desarrollan reacciones.

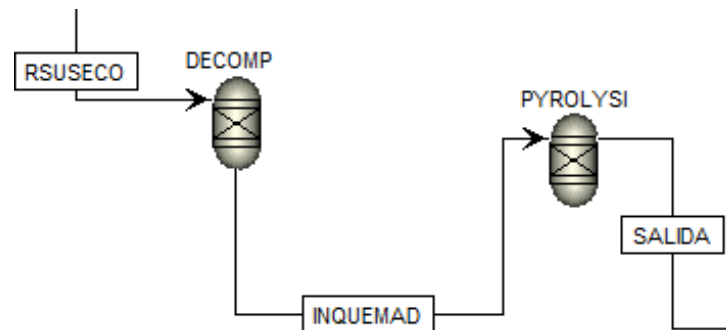


Ilustración 11 Proceso de pirólisis. Fuente: Aspen Plus

La distribución de los componentes de ingreso a la descomposición se establece mediante ecuaciones en un bloque de calculadora en el lenguaje Fortran, donde los productos de la descomposición se especifican como moles o masa por unidad de masa de alimentación.

Los campos calculados se normalizan para mantener el balance de masa. En la ilustración 12, se muestra el proceso realizado.

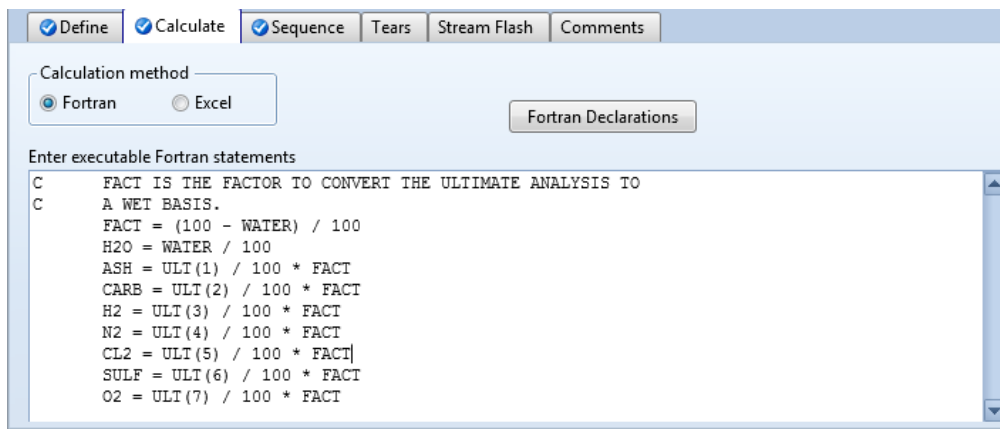


Ilustración 12 Distribución de los productos de la pirólisis

El siguiente paso fue analizar los parámetros de funcionamiento del reactor, para ello se observan dos condiciones de temperatura del proceso, una de un sistema de pirólisis lenta y una de pirólisis rápida. Este proceso se realiza con el fin de identificar en que condición, la conversión de los residuos es más apropiada. Es decir, verificar a que condición hay mayor conversión de gas aprovechable para las siguientes etapas que conversión de cenizas, que son productos sin valor en el proceso.

Tras analizar ambas opciones se reveló que la generación de productos sólidos es directamente proporcional al aumento de la temperatura del proceso. Es decir, en la pirolisis lenta hay menos sólidos y más gas, mientras que a la condición de pirolisis rápida hay menos productos gaseosos.

Es por esto, que se optó por la condición de pirólisis lenta.

✓ **Proceso de Reducción**

Después se prosigue con la simulación de la tercera etapa del proceso, en este caso la reducción. En este proceso se obtiene el gas de síntesis crudo, compuesto por cada uno de las resultantes de la oxidación-reducción de los productos de la pirólisis.

Dado que este proceso requiere de una entrada de aire se ubica un bloque de mezclado antes de su ingreso. En el mezclador se van a unir los productos de la pirólisis (inquemados) con la corriente de aire de salida del secado.

Ambas corrientes se encuentran a condiciones de temperatura diferentes por lo que ocurre un ligero enfriamiento de la corriente antes del ingreso a la zona de reducción.

La reducción se simula con un reactor tipo RGibbs, el cual restringe las reacciones específicas de equilibrio químico permitiendo calcular la composición de los gases de salida mediante la minimización de la energía libre de Gibbs. Estas reacciones

de tipo endotérmicas se llevan a cabo gracias al calor suministrado por la etapa de oxidación. Este calor varía según la relación de equivalencia usada en el aire del secado. Este calor define la condición de temperatura de la reducción y por lo tanto también las reacciones a desarrollarse y los componentes a producirse.

El diagrama final de este proceso es el mostrado en la ilustración 13.

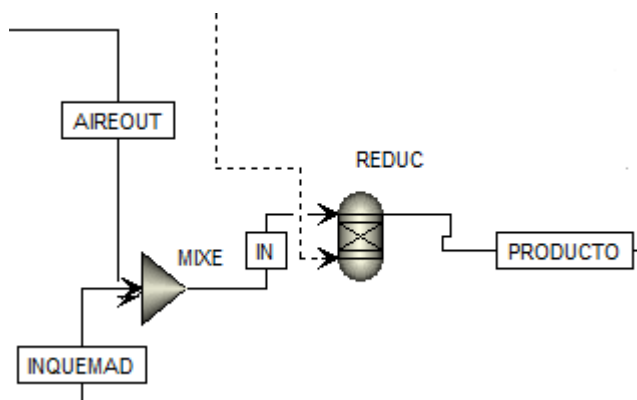


Ilustración 13 Proceso de Reducción. Fuente: Aspen Plus

Los productos finales del gasificador son llevados a un separador tipo SSplit, el cual se encarga de retirar las cenizas producidas en las etapas anteriores para que no interfieran en la combustión. La corriente de productor gaseosos se dirigirá ahora a la combustión. El diagrama se muestra en la ilustración 14.

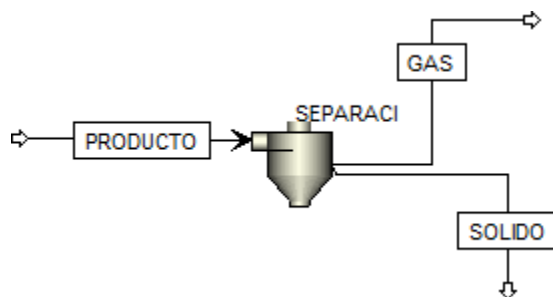


Ilustración 14 Proceso de separación de sólidos. Fuente: Aspen Plus

✓ **Proceso de Oxidación**

La última etapa del proceso es la combustión, la cual fue simulada con ayuda de un reactor Rstoic, en el cual se plantean algunas de las ecuaciones de tipo exotérmicas de la tabla 1 que se desarrollarán según las condiciones de funcionamiento de los procesos anteriores.

La etapa de combustión se realizó como se muestra en la ilustración 15.

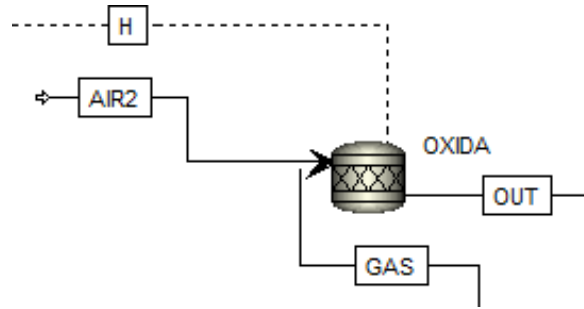


Ilustración 15 Proceso de combustión. Fuente: Aspen Plus

La entrada de aire al proceso fue determinada con la relación aire combustible, teniendo en cuenta que el aire ingresado debe que ser mayor al valor estequiométrico con el propósito de asegurar la oxidación completa de los productos de la reducción.

4.3.2 Ciclo de generación de energía

La primera etapa de esta sección se realiza en el software Matlab, en el cual se pudo determinar la temperatura de los humos en el punto pinch y el flujo másico del agua del ciclo, esto a partir de los valores de las entalpías en las entradas y salidas de ambas secciones del intercambiador de calor. Para determinar el flujo de agua se requiere encontrar el cambio de entalpía de este fluido entre su punto de salida del intercambiador y el punto pinch, donde se inicia su vaporización, además de conocer el flujo másico de los gases de combustión, 851,096 kg/h, y sus condiciones de temperatura y calor específico tanto en el punto pinch y como en su entrada al intercambiador. La ecuación 20 indica como se realiza la estimación.

$$m_{agua} = \frac{m_{agua} \quad T_{aguain}}{h_{aguaout} - h_{aguaPP} \quad T_{aguaPP}} \Delta h \quad (20)$$

Para determinar las demás incógnitas se debió igualar el calor de intercambio del proceso, como se indica en las ecuaciones 21 a la 24.

$$Q_{gas} = Q_{agua} \quad (21)$$

$$Q = m * \Delta h \quad (22)$$

$$Q_{agua} = m_{agua} * (\Delta h_{aguain-aguaPP}) + h_{fg,agua@T2x} \quad (23)$$

$$Q_{gas} = m_{gas} * (C_{p,gas} * (T_{gasin} - T_{gasPP})) \quad (24)$$

En el software debe agregarse un parámetro más, el cual es el ΔT mínimo. Los demás valores del proceso se hallan mediante el software EES. A partir de estas entradas Matlab desarrolla un proceso iterativo donde, a través de la variación del flujo másico de agua se determina la temperatura de los humos en el punto pinch.

Con esta temperatura se puede entonces determinar el calor máximo transferido con la ecuación (24).

La segunda etapa de la generación es el ciclo Rankine, el cual se lleva a cabo en la herramienta de cálculo Engineering Equation Solver donde se replica el funcionamiento del ciclo. Como uno de los parámetros de entrada a este proceso se utiliza el calor transferido hallado en la etapa anterior.

El Ciclo Rankine se encuentra compuesto por 4 secciones: turbina, condensador, bomba y caldera. Para el caso expuesto la caldera se cambia por un intercambiador de calor, ya que el calentamiento del fluido se hace gracias a la transferencia de calor proveniente de los gases de combustión de la oxidación en dos etapas. El diagrama de proceso se muestra en la ilustración 16.

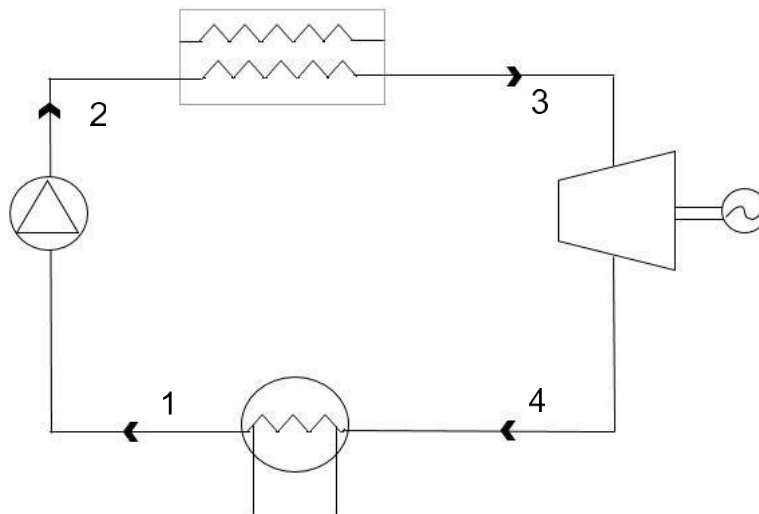


Ilustración 16 Diagrama de proceso de ciclo Rankine. Realización propia

Inicialmente se definieron condiciones de funcionamiento del ciclo en dos de las etapas, salida del intercambiador de calor y salida de la bomba, para lo que se utilizaron datos de presión y temperatura de equipos en catálogos. Para la turbina de vapor se selecciona la turbina marca Siemens de referencia SST-3000, donde la temperatura de entrada del vapor es de 565°C y la presión alcanzada es de 177 bar, mientras que, la bomba seleccionada es de marca Goulds pumps, modelo VIC que alcanza una presión de 172,36 bar.

Teniendo en cuenta lo anterior se escoge como presión en los procesos de bombeo y transferencia de calor 172,36 bar y como aumento de temperatura del fluido en el intercambiador 50°C a 565°C.

Posteriormente se definen los demás parámetros en cada etapa teniendo en cuenta el comportamiento de presiones y entropías constantes del ciclo, por medio de la gráfica termodinámica presentada en la ilustración 6 de la sección 2.4.6 del presente libro.

Luego, con las condiciones de los 4 procesos se determina el trabajo realizado por la turbina de vapor y el trabajo consumido por la bomba, mediante las ecuaciones 25 y 26 respectivamente.

$$\dot{w}_{turbina}[kW] = m_{agua} \left[\frac{kg}{h} \right]^* \frac{(\Delta h_{intercambiador}) \left[\frac{kJ}{kg} \right]}{3600 [s]} \quad (25)$$

$$\dot{w}_{bomba}[kW] = m_{agua} \left[\frac{kg}{h} \right]^* \frac{(\Delta h_{bomba}) \left[\frac{kJ}{kg} \right]}{3600 [s]} \quad (26)$$

Finalmente, se estima que el factor de planta de funcionamiento de sistemas de este tipo es de hasta 0,95, valor basado en estudios similares como en, Converting Municipal Solid Waste into energy. [8]

5 RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS ÚLTIMO Y ANÁLISIS PRÓXIMO

De manera teórica, se determinaron los elementos químicos que componen los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Bucaramanga. Tras resolver las ecuaciones (6-12) de la sección 4.1.2 del presente documento se obtuvo el análisis último representado en fracción másica y base seca. Los resultados se presentan en la tabla 4.

Tabla 3 Análisis último de los residuos. Fuente Propia

Componentes	Análisis último (% peso, base seca)
Carbono	42,132%
Hidrógeno	5,919%
Oxígeno	33,744%
Nitrógeno	0,682%
Azufre	0,196%
Cloro	0,154%
Cenizas	17,174%

Para este análisis se tiene en cuenta el elemento cloro, que generalmente no es usado en estudios de RSU, ya sea porque se hace una previa separación de los residuos que contienen este elemento o para evitar lidiar con la generación de contaminantes formados a partir de este.

De igual manera, tras determinar el análisis próximo de los residuos, con las ecuaciones (12-14) de la sección 4.1.2 del presente documento, se obtuvieron los resultados que indican la cantidad de cenizas, volátiles y carbón fijo en la alimentación del gasificador. Estos se muestran en la tabla 5.

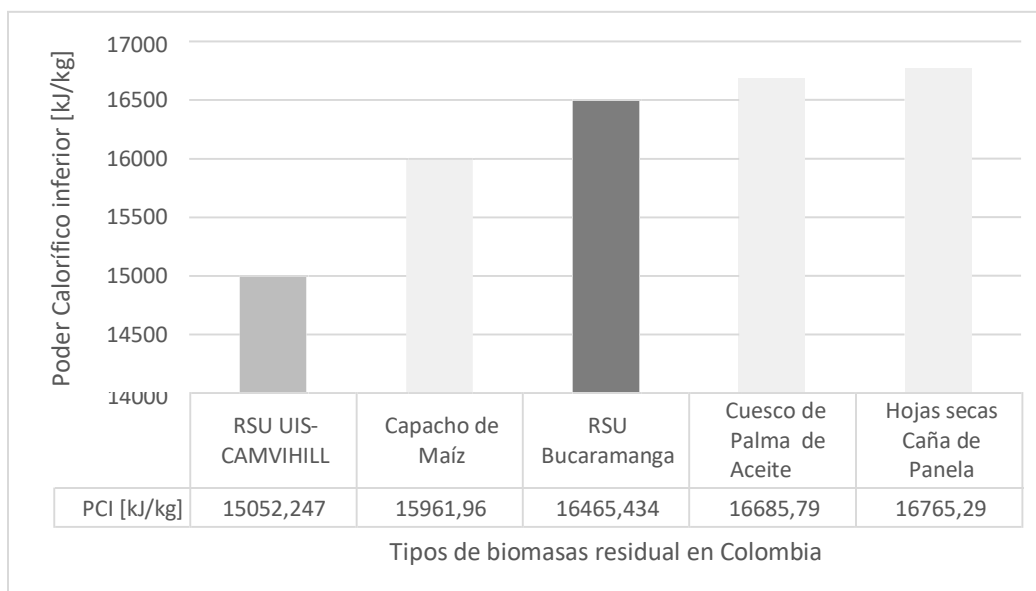
Tabla 4 Análisis próximo de los residuos. Fuente Propia

Componentes	Análisis próximo (% peso, base seca)
Carbón Fijo	18,38%
Volátiles	64,45%
Cenizas	17,17%

5.2 CONTENIDO ENERGÉTICO DE LOS RSU

El poder calorífico teórico de los RSU se determinó al usar la fórmula de Dulong, indicada en la ecuación (15) de la sección 4.1.3 del presente documento, siendo su valor de 3932,701 kcal/kg (16465,434 kJ/kg). Este resultado permite una comparación con el promedio de las 5 muestras recolectadas en el informe UIS-CAMVIHILL S.A.S, el cual presenta un valor aproximado de 3595,1675 kcal/kg (15052,247 kJ/kg), con lo que se puede determinar un error relativo porcentual de 9,394% entre ambos valores.

Según los valores consultados en el documento “Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el Departamento de Cundinamarca” de C, Serrato, se pudo observar una similitud entre el poder calorífico determinado de los RSU de Bucaramanga con otros tipos de biomasa residual [49], como se muestra en la gráfica 1:



Gráfica 1 Poder Calorífico de biomasa residual en Colombia. Realización Propia. Fuente: Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el Departamento de Cundinamarca

Como se puede observar, el resultado obtenido se acerca a los valores de PCI de las biomasas de capacho de maíz y cuesco de palma de aceite. Los RSU poseen entonces, un poder calorífico inferior 3,15% mayor al capacho de maíz y 1,321% menor al del cuesco de palma de aceite.

5.3 COMPONENTES DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Como resultado de la simulación en el software Aspen Plus se obtiene el siguiente diagrama de una planta de gasificación en dos etapas con sistema de generación de energía a partir de ciclo Rankine. Donde se indica cada uno de los equipos, procesos llevados a cabo y corrientes de masa y energía que intervienen para su funcionamiento.

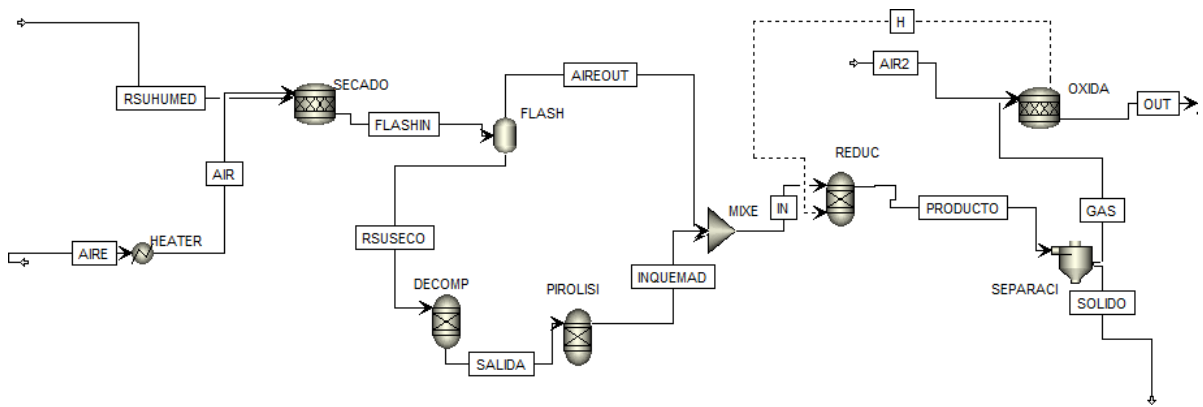


Ilustración 17 Diagrama de proceso de oxidación en dos etapas. Realización Propia

5.3.1 Incidencia de la relación de equivalencia en la formación de componentes

Como se observa en la Tabla 2 de la sección 4.1.3 del presente trabajo, la variación de la relación de equivalencia limita la entrada de aire al proceso de secado y por ende al proceso de reducción, entendiéndose que el flujo másico de aire es directamente proporcional a la relación de equivalencia.

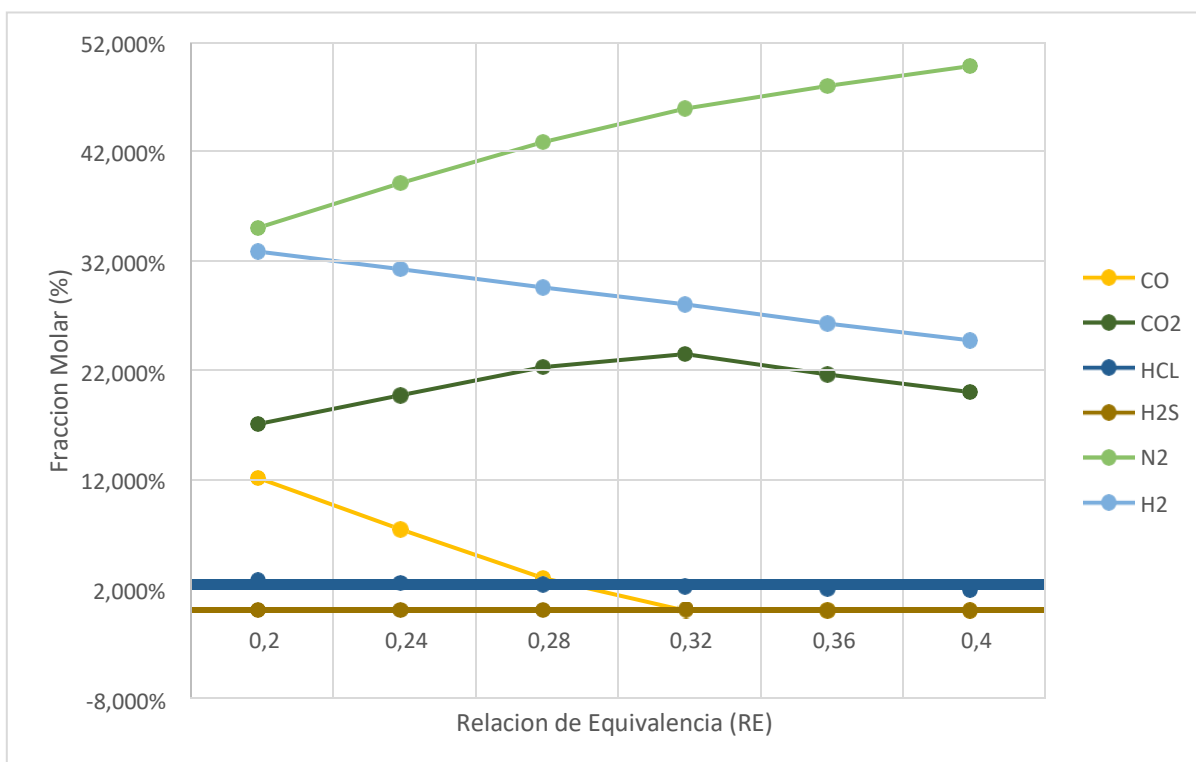
A partir de estos valores se analizó la influencia de la relación de equivalencia en la composición final de los gases de reducción y oxidación. En las tablas 5 y 6 se indica la fracción molar de cada uno de los gases generados en el proceso para la reducción y la oxidación respectivamente

En la tabla no se tienen en cuenta los componentes S, Cl₂, H₂O y SO₂ ya que sus valores se consideran despreciables por encontrarse en rangos inferiores a 10⁻⁴ dentro de la fracción molar.

Tabla 5. Fracción molar de los gases de reducción según la relación de equivalencia

Relación de Equivalencia	Componentes del syngas crudo							
	H ₂ S	CH ₄	CO	CO ₂	HCL	N ₂	H ₂	O ₂
0,2	0,051%	0,206%	12,121%	17,053%	2,747%	34,998%	32,820%	0,000%
0,24	0,047%	0,000%	7,422%	19,694%	2,535%	39,090%	31,207%	0,000%
0,28	0,041%	0,000%	2,979%	22,253%	2,359%	42,813%	29,551%	0,000%
0,32	0,000%	0,000%	0,001%	23,449%	2,193%	45,888%	27,988%	0,441%
0,36	0,000%	0,000%	0,000%	21,589%	2,019%	47,973%	26,224%	2,157%
0,4	0,000%	0,000%	0,000%	19,973%	1,867%	49,784%	24,693%	3,648%

Los resultados se presentan también en la gráfica 2 para facilitar su análisis



Gráfica 2 Fracciones de productos de la reducción según la relación de equivalencia. Fuente Propia

Tras el proceso de reducción se puede apreciar que los gases más predominantes son el CO₂, N₂ y H₂. El porcentaje de N₂ se explica dado que es un componente que aumenta según el ingreso de flujo másico de aire, el CO₂ es producto de la oxidación del carbono en la reducción el cual se encuentra en mayor medida para valores

altos de aireación dado que más cantidad de O₂ puede reaccionar. Finalmente, el H₂ es un resultante de la conversión del H₂O. Se puede apreciar que con RE más bajos su valor es mayor dado que se limitan las reacciones de oxidación. El valor máximo obtenido de este compuesto es de 32,8% fracción molar para una RE de 0,2, valor que se puede confirmar con resultados en literatura como “Future district heating plant integrated with municipal solid waste gasification for hydrogen production”. S. Rudra. [50] Confirmando que los valores obtenidos se asemejan a la realidad.

Tabla 6 Fracción molar de los gases de oxidación según la relación de equivalencia

Relación de Equivalencia	Componentes de los gases de combustión							
	H ₂ S	CH ₄	H ₂ O	CO ₂	HCL	N ₂	H ₂	O ₂
0,2	0,016%	0,000%	10,111%	8,939%	0,836%	71,014%	0,000%	9,085%
0,24	0,015%	0,000%	9,917%	8,618%	0,806%	71,167%	0,000%	9,477%
0,28	0,014%	0,000%	9,736%	8,313%	0,777%	71,311%	0,000%	9,848%
0,32	0,014%	0,000%	9,577%	8,024%	0,750%	71,453%	0,000%	10,182%
0,36	0,000%	0,000%	9,412%	7,749%	0,725%	71,582%	0,000%	10,519%
0,4	0,000%	0,000%	9,256%	7,486%	0,700%	71,705%	0,000%	10,840%

Después del proceso de oxidación se puede observar que ocurrió un proceso de combustión completa, lo que explica la ausencia de CO en los componentes, además del exceso de oxígeno. Este exceso de oxígeno se da ya que en la combustión debió ingresarse una cantidad mayor al aire estequiométrico por dos razones, primero asegurar la eliminación de contaminantes y segundo, como método de control de la temperatura de la combustión. Por lo anterior, los gases de combustión se componen principalmente de N₂, H₂O, CO₂ y O₂.

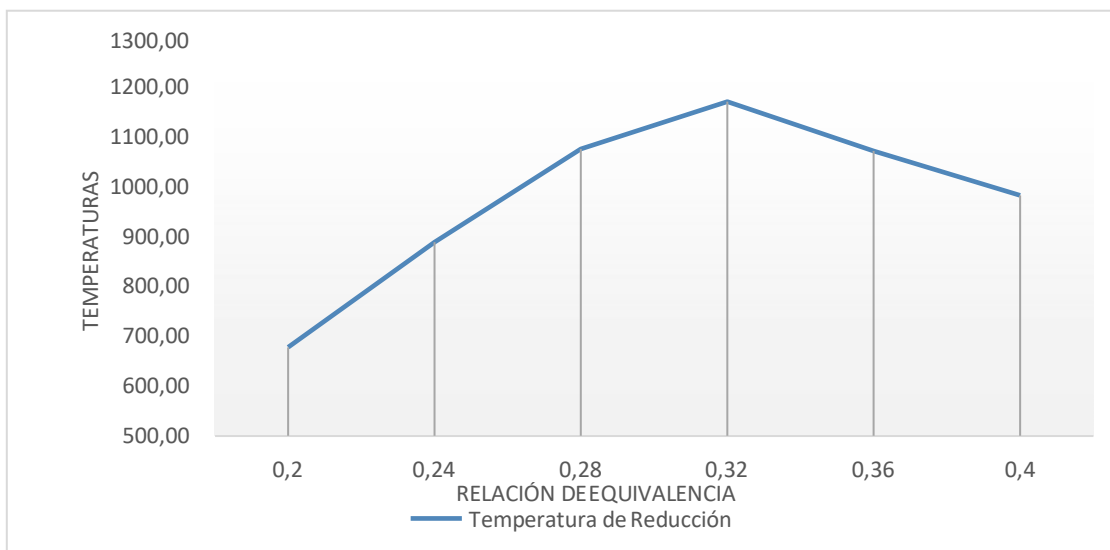
Para comparar su influencia se presenta la siguiente gráfica que recopila la información del comportamiento de los gases: CO, CO₂, HCL, H₂O, N₂ y H₂, después del proceso de combustión.

5.3.2 Incidencia de la relación de equivalencia en la temperatura de la reducción

En la gráfica 3 se observa que la temperatura del proceso, según la RE, varía en un rango de 677°C a 1172°C, valor que concuerda con los valores especificados en la sección 1.4.3 del presente documento y con datos registrados en literatura. “Diseño de un reactor continuo de gasificación”. A. Castello [24]

Para el valor de RE de 0,32 se produce un punto de inflexión, en el que se alcanza la temperatura máxima posible del proceso para después descender. Este

comportamiento se produce ya que para esa relación de equivalencia la entrada de aire es mayor a la requerida por lo que hay exceso de nitrógeno y se reducen la cantidad de reacciones que ocurren, lo que produce que disminuya la temperatura del proceso.

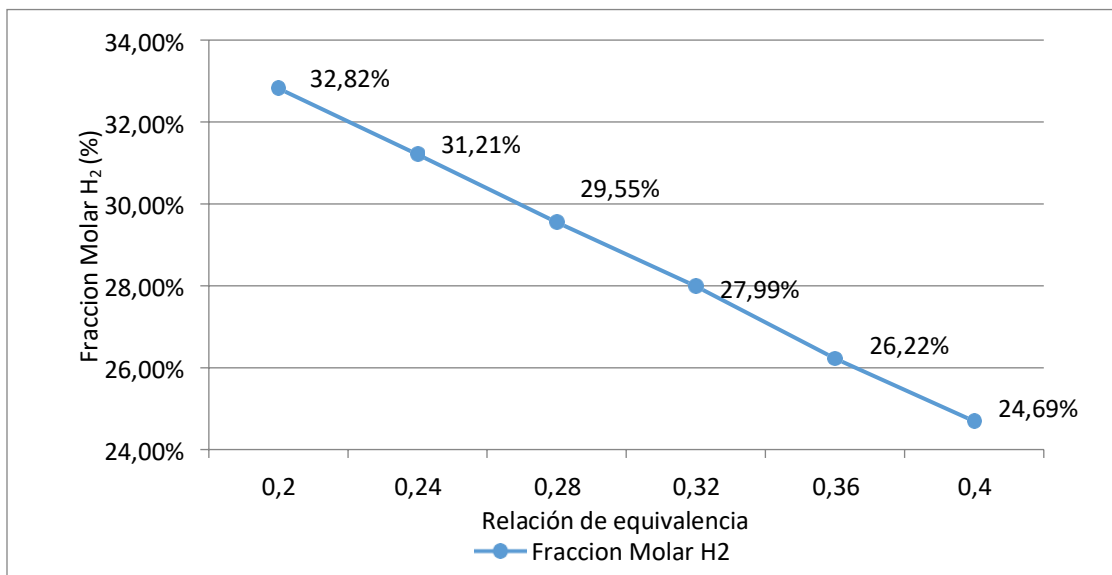


Gráfica 3 Temperatura de reducción según relación de equivalencia. Fuente Propia

5.3.3 Incidencia de la relación de equivalencia en la generación de hidrogeno

En los procesos de gasificación convencional, uno de los parámetros de la calidad del gas de síntesis producido es la fracción de hidrogeno que éste presenta, dado que es uno de los principales contribuyentes para determinar el poder calorífico del gas. Además, altas concentraciones este componente en el syngas permite la producción de productos químicos, combustibles líquidos o de hidrogeno puro.

Para el sistema planteado en este análisis, la producción del hidrogeno es definida por la variación de la relación de equivalencia como se muestra en la gráfica 4.



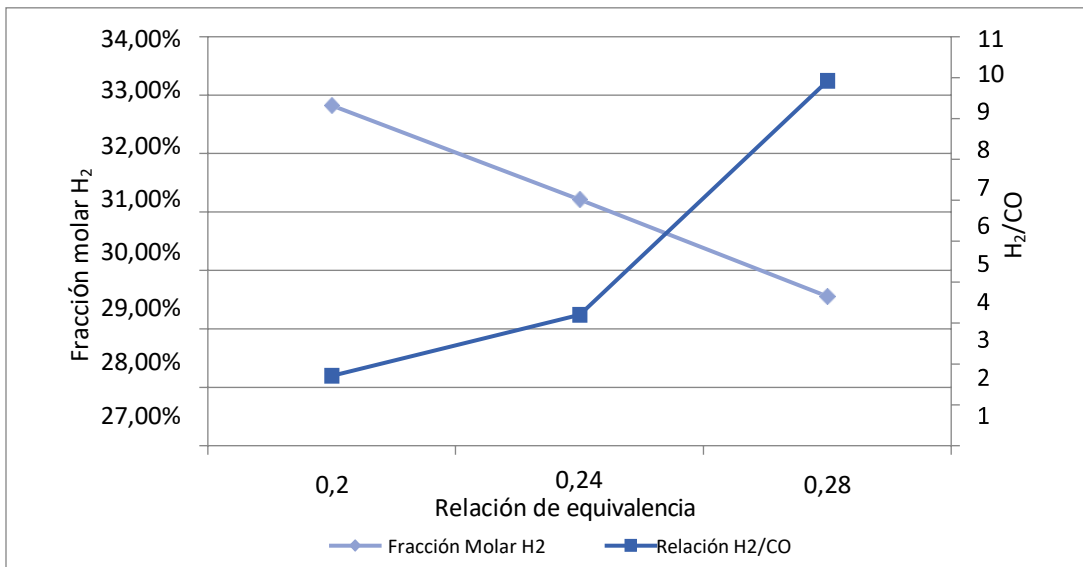
Gráfica 4 Generación de hidrogeno según la relación de equivalencia. Fuente Propia

Los datos reflejados en la grafica muestran las variacion del H₂, indicando un comportamiento inversamente proporcional, dado que con mayor ingreso de flujo de aire se propician las reacciones de oxidación del hidrogeno. Teniendo en cuenta lo anterior, una baja relación de equivalencia, como 0,2, sería la ideal para que el gas de síntesis se usara en un motor de combustión interna o para producción de químicos, sin embargo, para lograr esto se requeriría antes de un tratamiento de limpieza riguroso para eliminar los agentes contaminantes aun presentes.

5.3.4 Relación H₂:CO

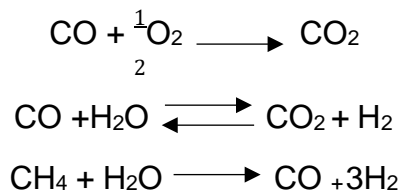
Esta relación se realiza para analizar el comportamiento de las fracciones de H₂ y CO en el gas tras la combustión y determinar cuál de los dos elementos se está consumiendo a un mayor ritmo, para así entender cuáles reacciones químicas prevalecen en el proceso. Cuando el valor de la relación es mayor a 1 indica que la concentración de hidrogeno es mayor que la de carbono, y si este está por debajo de 1 entonces la concentración de carbono es mayor.

En la siguiente gráfica se presenta la fracción molar de H₂ en los gases de la combustión para diferentes relaciones de equivalencia y la relación de los elementos H₂ y CO para analizar sus variaciones.

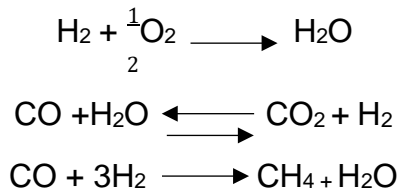


Gráfica 5 Relación H₂/CO. Fuente Propia

En la gráfica 5, como se indicó anteriormente, se observa como decrece el contenido de H₂ con el aumento de la relación de equivalencia. En el caso de la relación H₂/CO se observa que el comportamiento siempre es ascendente, indicando que el carbono se consume a una tasa mayor que el hidrogeno, lo que indicaría que en el reactor se están produciendo las siguientes reacciones.



En el caso en que el comportamiento de la línea H₂/CO fuera decreciente, indicaría que el hidrogeno se consume en una tasa mayor que el carbono. Por lo que se inferiría que las reacciones que más se desarrollan son:

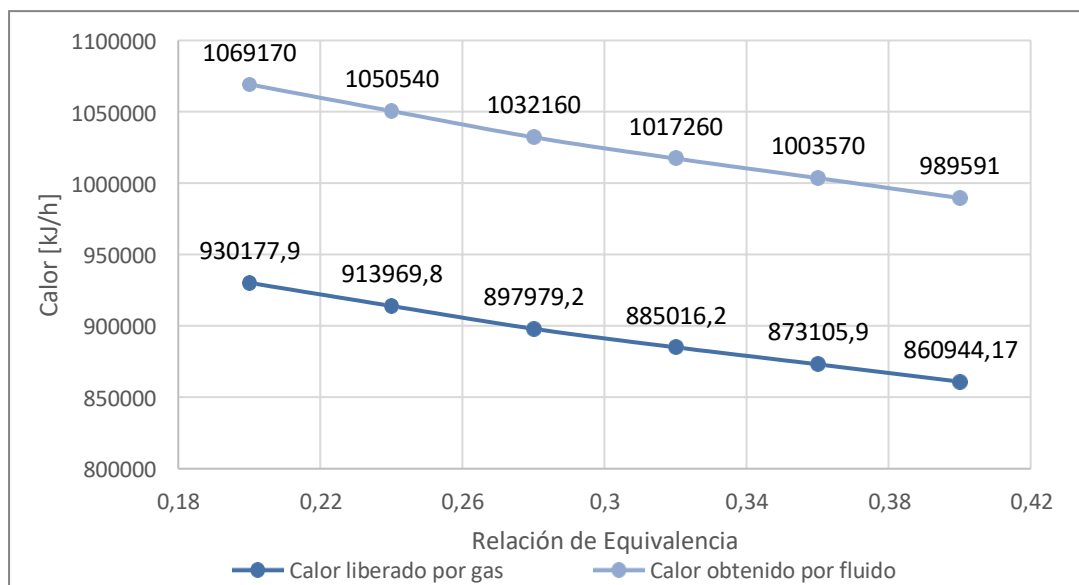


5.4 APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS

5.4.1 Incidencia de la relación de equivalencia en el calor generado en la combustión

Al realizar la variación de la relación de equivalencia también se observó el cambio en el calor expulsado por los gases de la oxidación en su paso por el intercambiador de calor, recordando que se establece que la temperatura de salida del proceso de intercambio son 200°C. Los resultados se presentan en kJ/h y están dados para relaciones de equivalencia de 0,2 a 0,4.

En la gráfica 6 se presenta el calor entregado por los gases y el calor recibido por el fluido de trabajo del ciclo Rankine.



Gráfica 6 Calor en el intercambiador según la relación de equivalencia

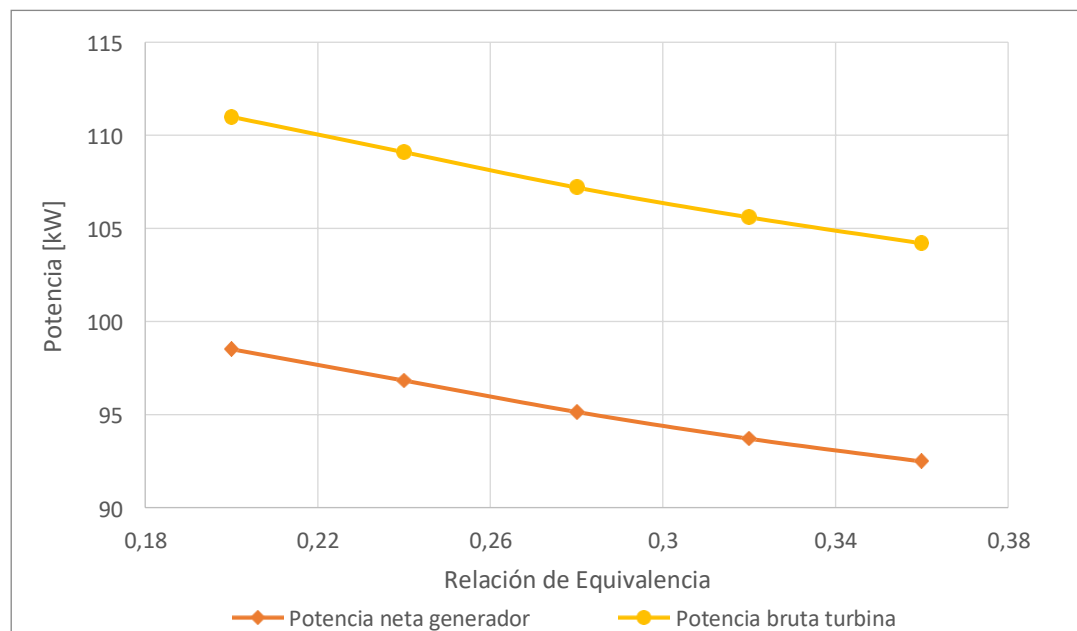
A partir de lo anterior, se observa que con el aumento de la relación de equivalencia el calor aprovechable es menor. Esto se presenta dado que, al ingresar más aire al proceso, muy por encima del estequiométrico, la eficiencia del proceso decrece. Como se indicó en la sección 5.3.1, al proceso se ingresa una cantidad de aire mayor a la requerida para la combustión completa, así que, para una RE mayor, el ingreso de aire se considera excesivo, lo que provoca, exceso de oxígeno que no reacciona y de nitrógeno que no reaccionan y disminución en la temperatura del proceso de oxidación. Para el caso de aprovechamiento térmico la mejor condición

a desarrollarse es la de RE de 0,2, donde el flujo másico de los gases de combustión que entran al intercambiador es de 851,0964 kg/h.

En este proceso se puede determinar que del calor de los gases aproximadamente el 87% es aprovechable en el ciclo Rankine para el calentamiento del agua. El flujo másico de agua requerido para lograr este valor en el intercambiador es de 467,088 kg/h.

5.4.2 Incidencia de la relación de equivalencia en la potencia de la turbina

La simulación del ciclo Rankine permitió graficar el comportamiento de la potencia bruta y neta de la turbina con respecto a la relación de equivalencia. Ese comportamiento se ve reflejado en la gráfica 7.



Gráfica 7 Potencia bruta de la turbina según la relación de equivalencia

Los resultados de la potencia instantánea se encuentran ligados a el calor aprovechado por el fluido del ciclo Rankine, por lo cual tienen el mismo comportamiento. La potencia bruta es la producida en la turbina gracias al trabajo realizado por el fluido, mientras que la potencia neta tiene en cuenta la conversión de energía en un generador eléctrico, en el cual se generan pérdidas, además del consumo de potencia instantánea de la bomba del ciclo.

Se determina que la potencia producida en el ciclo, según las variaciones de RE, oscila entre 92,48 kW y 98,51 kW.

5.5 EMISIONES CONTAMINANTES

Dado que la tecnología planteada no cuenta con un proceso de limpieza de los gases de combustión (que tras el intercambio de calor se encuentran a 200°C) y que estos serán emitidos a la atmosfera tras finalizado el proceso de aprovechamiento energético se quiso comprobar si los niveles de agentes contaminantes emitidos cumplían con la normativa colombiana.

Los límites permitidos se encuentran expedidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia en la resolución 058 de 2002 [51], “Por la cual se establecen normas y límites máximos permisibles de emisión para incineradores y hornos crematorios de residuos sólidos y líquidos”.

Teniendo en cuenta la tabla 2 del artículo 4 de la resolución, se conocen las concentraciones límite de emisiones en un tiempo de operación promedio diaria.

En la Tabla 7 de este documento se indican los contaminantes emitidos después del proceso de oxidación en dos etapas y su concentración con la relación de equivalencia de 0,2 en la cual, según el análisis de la tabla 6, es la generadora de mayor cantidad de agentes contaminantes. Este valor se compara con la concentración límite dada por la regulación.

Tabla 7 Comparación concentraciones de contaminantes. Fuente: Resolución 058 de 2002. Ministerio de Ambiente. Realización Propia

Contaminante	Límite de Concentración (mg/m³)	Resultado de Concentración (mg/m³)
Hidrocarburos Totales HCT dados como Metano CH ₄	20	0
Compuestos gaseosos de Cloro inorgánico, dados como ácido Clorhídrico (HCl)	60	26,58
Óxidos de Azufre, dados como dióxido de Azufre (SO ₂)	200	0,0000001
Monóxido de Carbono CO	100	0

Con lo anterior se puede observar que ninguno de los contaminantes se encuentra fuera del límite establecido por el Ministerio de Ambiente, por lo que se está cumpliendo con la normativa nacional.

5.6 GENERACIÓN DE ENERGÍA

Para realizar el análisis de generación de energía se tiene en cuenta la relación de equivalencia de 0,2 por su alto aprovechamiento energético de los residuos. Se plantea que el factor de planta del sistema es 0,95, es decir, 8400 horas y que la potencia de la turbina del sistema es de 111 kW. Teniendo en cuenta la eficiencia típica de un generador eléctrico, 90%, y el consumo de la bomba del sistema se calcula que la generación eléctrica es de 98,51 kWh

Por lo que la generación anual del sistema es de 819.850kWh/año, suficiente para suplir la demanda promedio de 390 hogares del sistema interconectado nacional (tomando como referencia con un consumo de 175kWh/mes). Además, al llevar a cabo este proceso se estaría haciendo uso de 840 toneladas de residuos anualmente, que representan el 0,53% de la generación de esta.

5.6.1 Eficiencia del proceso

Para determinar la eficiencia del gasificador se usa la eficiencia de tipo caliente, en la cual se considera el calor sensible del gas a la salida sin enfriarse, es decir, aprovechando las temperaturas altas con las que sale del reactor. La ecuación 27 es la empleada [52]:

$$\eta = \frac{m_{gas} * PCI_{gas} + m_{gas} * n_{gas}}{m_{biomasa} * PCI_{biomasa} + m_{aire} * h_{aire}} \quad (26)$$

Con los resultados del simulador y de la herramienta de cálculo se obtiene que la eficiencia del proceso es de 28,48%, este valor se explica porque el gas de salida de la oxidación está compuesto de componentes que aportan valores muy bajos al poder calorífico del gas como lo son, nitrógeno, agua, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico. Sin embargo, esto no se entiende como una desventaja en el proceso ya que el verdadero aprovechamiento del calor de estos gases se da por su alta temperatura, no por su poder calorífico, el cual es de 3143 kJ/kg.

También se halla la eficiencia del ciclo Rankine para la generación de energía, a través de la ecuación 28:

$$\eta = \frac{W_{\text{electrico}}}{Q_{\text{entrada}} + W_{\text{bomba}}} \quad (28)$$

Los valores de cada una de estas variables y la eficiencia del proceso se muestran en la tabla 9.

Variable	Significado	Resultado
<i>W electrico</i>	Trabajo de la turbina [kJ/h]	390562
<i>Q entrada</i>	Calor del intercambiador [kJ/h]	930177
<i>W bomba</i>	Trabajo de la bomba [kJ/h]	4890
η	Eficiencia del ciclo [%]	44,5

Con lo que se observa que la eficiencia del proceso es del 44,5%, valor concordante con datos experimentales de estudios anteriores, como “Generación eléctrica con biomasa”. E. Puentes. [53]

6 CONCLUSIONES

Con el proceso de simulación realizado en el software Aspen Plus se determinó que es posible la generación de energía a partir de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Bucaramanga mediante el proceso de oxidación en dos etapas para la gasificación de los residuos. Los resultados obtenidos se basan para el valor establecido de 100 kg/h de residuos usados como alimentación del proceso.

1. Se determinó de manera teórica que el contenido energético de los residuos sólidos de la ciudad de Bucaramanga es de 3932,701 kcal/kg (16465,434 kJ/kg). Valor que es acorde con datos típicos de poder caloríficos de biomasa de este tipo.
2. Con las condiciones planteadas del proceso y con las variaciones de la RE usadas se logra limitar la generación y liberación a la atmosfera de agentes contaminantes como CO, CH₄, HCl y H₂S. Además, la generación de dioxinas se limita por los valores bajos de HCL en los gases de salida del proceso, representando en fracción molar un valor máximo de 0,836% en la composición de estos, lo que se traduce en una concentración diaria de 26,58 mg/m³ que cumple con el límite de generación de emisiones contaminantes para sistemas incineradores estipulados por el Ministerio de Ambiente de Colombia.
3. Se determina que la mejor relación de equivalencia para lograr el fin de aprovechamiento energético es 0,2, en el cual se limita el exceso de aire en la reducción y oxidación del sistema y la temperatura en la oxidación. Este valor permite que los gases de la combustión alcancen un valor de calor de 1.069.170 kJ/h, gracias a las reacciones exotérmicas ocurridas en la oxidación.
4. Se logra establecer que para la planta con condiciones de alimentación de 100kg/h y RE de 0,2 la capacidad de la turbina de generación es de 98,51 kW, si se tiene en cuenta que las horas de operación del sistema es de 8400 horas, la generación de energía eléctrica es de 819.850 kWh/año.
5. Al llevar a cabo este proceso se logra el aprovechamiento anual de 840 toneladas de residuos sólidos urbanos del Carrasco, lo que brinda una solución efectiva al tratamiento y uso de espacio actual de los residuos

6. El proceso de oxidación en dos etapas planteado alcanza una eficiencia en caliente de 28,48%, valor bajo para una gasificación típica donde el producto sea un gas de síntesis que alimentará un proceso químico, sin embargo, para el sistema planteado en este documento este valor no es relevante, ya que el aprovechamiento de los residuos depende del calor que sea generado por los gases tras la oxidación y que posteriormente será transferido al fluido de trabajo del ciclo Rankine.

7 RECOMENDACIONES

1. Como sistema secundario al presentado en este documento se puede implementar un sistema de limpieza de los gases de salida del intercambiador de calor, que cuente con los siguientes procesos: Retención de material particulado, lavado ácido para retirar azufre, instalación de catalizador ZM5 para retirar el HCl y cloro e instalación de un catalizador trifásico, con el propósito de eliminar CH₄, CO, NO_x, dioxina y furanos, los cuales pueden llegar a existir, pero en proporciones muy bajas.
2. Si se desean ampliar los resultados presentados en este proyecto se debería realizar un proceso donde se escalen los flujos de entrada de residuos sólidos urbanos y se analicen las correcciones respectivas de las condiciones del proceso, para así determinar la generación de energía eléctrica y de agentes contaminantes a mayores proporciones.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Periathamby, *Waste. A Handbook for Management*, 2011.
- [2] Departamento Nacional de Planeación, «Informe Nacional Disposición Final de Residuos Sólidos,» 2016.
- [3] L. Á. Rodríguez Escobar, «Towards Environmental Management of Solid Residues in large Latin-american Cities,» 2002.
- [4] Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, «Comunicaciones ANLA,» 2018.
- [5] K. S. Assaf Carrascal, *Sitio de disposición final de residuos sólidos el carrasco y la afectación a derechos fundamentales y colectivos*, 2012.
- [6] L. E. Contreras Manzano, *Evaluación Ambiental Ex – Post Del Sitio De Disposición Final De Residuos Sólidos El Carrasco En El Municipio De Bucaramanga*, 2012.
- [7] S. Consonni y F. Viganò, «Waste gasification vs conventional Waste-To-Energy: A comparative evaluation of two commercial technologies,» 2012.
- [8] D. Moratorio, I. Rocco y M. Castelli, «Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía/Converting Municipal Solid Waste into energy,» 2012.
- [9] Departamento Administrativo de la Función Pública, *Decreto 1784 de 2017*, 2017.
- [10] D. Hankoto, «Aspen Plus Modeling Approach in Solid Waste Gasification,» de *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, 2019, pp. 259-281.
- [11] Agencia Extremela de la Energía, *La biomasa forestal*, 2013.
- [12] N. Ayala, «Bioenergía a partir de residuos forestales,» *Madera y Bosques*, 2018.
- [13] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, *Residuos agrícolas y ganaderos*, 2014.
- [14] Danny Nuñez, «Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta,» *Tecnura*.

- [15] J. Fernández, Energías renovables para todos - Biomasa.
- [16] Secretaría de energía Argentina, Energía Biomasa.
- [17] Y. Arboleda, «Fundamentos para el diseño de biodigestores,» Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [18] Y. Vargas, «Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente,» *Facultad de Ciencias Básicas*, 2018.
- [19] Alcaldía de Bucaramanga, «Plan de gestión integral de residuos sólidos PGIRS,» 2015.
- [20] D. Nestor, «Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas para Optimizar el Desempeño de Centrales Térmicas,» *Información tecnológica vol 3*, 2019.
- [21] D. Rua, «Generación de energía a partir de los residuos sólidos urbanos,» 2015.
- [22] Empresa De Aseo De Bucaramanga S.A, «Invitación pública para la selección de la nueva tecnología, su implementación y operación, para el tratamiento alternativo de la disposición final y el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos (RSU) en la ciudad de Bucaramanga,» 2017.
- [23] UIS, CAMVHIL S.A.S/CEIAM, «Características de los residuos sólidos generados en el municipio de Bucaramanga,» 2015.
- [24] A. Castello, «DISEÑO DE UN REACTOR CONTINUO DE GASIFICACIÓN,» 2014.
- [25] International District Energy Association, 2007.
- [26] S. Castro, «INSTALACIÓN Y ARRANQUE DE UN PROTOTIPO DE GASIFICACIÓN,» 2015.
- [27] P. Castellanos, «IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE UN GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO,» 2017.
- [28] M. Gomez, «Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización mediante algoritmos basados en nubes de partículas,» 2008.

- [29] A. Grimm, «Gasificación en flujo ascendente de madera pelletizada de abedul,» 2005.
- [30] I. Sánchez, «Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación,» 2014.
- [31] L. Carrasco, «DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN GASIFICADOR DE LECHO FIJO PARA LA PRODUCCION DE GAS DE SINTESIS,» 2015.
- [32] A. Heraz, Estudio de gasificación mediante un prototipo experimental para el tratamiento termoquímico de residuos orgánicos, 2012.
- [33] F. Moreno, Simulación de gasificación de biomasa en lecho fluidizado burbujeante, 2010.
- [34] G. Young, Municipal solid waste to energy conversion processes, 2010.
- [35] S. d. E. d. Argentina, Energías Renovables, 2008.
- [36] M. Cortázar, Estudio comparativo de tecnologías comerciales de valorización de residuos sólidos urbanos, 2014.
- [37] J. Barajas, Sistema de combustión a pequeña escala para la producción de energía limpia en zonas aisladas, 2015.
- [38] J. Speight, «Handbook of industrial hydrocarbon process,» 2011.
- [39] SAGE metering Inc, «Stoichiometric Combustion Impact on Boiler Efficiency,» 2013.
- [40] C. Forde, «Biobased Fats (Lipids) and Oils from Biomass as a Source of Bioenergy,» *Bioenergy research*, 2014.
- [41] G. Cujia y A. Bula, «POTENCIAL OBTENCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS,» 2010.
- [42] X. Lin y F. Wang, «Thermodynamic Equilibrium Analysis on Limitation of Moisture and Ash for Optimal Air Gasification of Municipal Solid Waste,» *Waste biomass valor*, 2016.
- [43] C. Hindsgaul, «High performance gasification with the two-stage gasifier,» 2001.
- [44] H. Zhou, «Classification and comparison of municipal solid,» *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2014.

- [45] A. L. Násner, Modelagem de uma Planta Piloto de Gaseificação de Combustível Derivado de de Resíduos (CDR) em um Sistema Integrado a Motor Ciclo Otto, Utilizando o Software Aspen Plus., 2015.
- [46] T. Hatanaka, «Role of Chlorine in Combustion Field in Formation of Polychlorinated Dibenzop-dioxins and Dibenzofurans during Waste Incineration,» 2005.
- [47] A. Almentero, «El análisis Pinch: integración y optimización en una planta de».
- [48] R. ESPINOSA, ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE LA TECNOLOGÍA DE GASIFICACIÓN, 2016.
- [49] C. Serrato, Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el Departamento de Cundinamarca, 2016.
- [50] F. d. h. p. i. w. m. s. w. (. g. f. h. production, «Souman Rudra,» *Energy*, 2019.
- [51] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Diario Oficial No. 44691 de enero 29 de 2002. RESOLUCION 058 DE 2002*, 2002.
- [52] J. Lesme, «ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UN GASIFICADOR “ANKUR” MODELO WBG-10 TRABAJANDO CON DIFERENTES BIOMASAS,» *Tecnología Química*, 2008.
- [53] E. Puentes, «Generación eléctrica con Biomasa. Evolución de la retribución en este tipo de tecnología,» 2017.
- [54] A. Heraz, «Estudio de gasificación mediante un prototipo experimental para el tratamiento termoquímico de residuos orgánicos,» 2012.

ANEXOS

ANEXO A. Composición física. “Caracterización de los residuos generados en el municipio de Bucaramanga”. 2015. Realizada por UIS y CAMVILL.S.A.S

Tipos de Residuos en el Carrasco	ton/año de residuo	Porcentaje de representación
Orgánicos	77.994	47,69%
Residuos de poda	8.069	4,93%
Papel archivo	1.664	1,02%
Papel periódico	838	0,51%
Papel revista	35	0,02%
Cartón corrugado	2.096	1,28%
Cartón plegadiza	1.281	0,78%
PET	1.694	1,04%
PEAD	1.168	0,71%
PVC	483	0,30%
PEBD	4.145	2,53%
PS	1.788	1,09%
Otros plásticos	1.501	0,92%
Caucho y cuero	1.653	1,01%
Textiles	5.108	3,12%
Madera	1.332	0,81%
Material ferroso	318	0,19%
Aluminio	40	0,02%
Cobre	-	0,00%
Vidrio	1.725	1,05%
Sanitarios	13.916	8,51%
Barreduras	4.131	2,53%
Residuo de construcción y remodelación	3.822	2,34%
Pilas	5	0,00%
Luminarias	16	0,01%
Residuos electrónicos	1.616	0,99%
Aerosoles	25	0,02%
Medicamentos vencidos	9	0,01%
Neumáticos	468	0,29%
Desechos peligrosos	72	0,04%
Hueso	248	0,15%
Tierra	593	0,36%
Otros residuos	25.688	15,71%
Total	163.540	100%

ANEXO B. Valores de análisis último para cada tipo de residuo.

Tipos de Residuos en el Carrasco	Componentes del análisis último						
	C	H	O	N	S	Cl	Cenizas
Orgánicos	43,50%	6,00%	44,00%	0,30%	0,20%	-	6,00%
Papel	40,40%	5,50%	42,30%	0,20%	0,20%	-	11,42%
Poda y jardinería	47,80%	6,00%	38,00%	3,40%	0,30%	-	4,50%
Cartón	43,90%	5,70%	41,60%	0,30%	0,20%		8,28%
PET	62,20%	4,40%	33,10%	0,10%	0,00%	-	0,20%
PEAD	84,90%	14,20%	0,30%	0,00%	0,00%	-	0,58%
PVC	37,20%	4,60%	0,00%	0,10%	0,30%	51,90%	5,86%
PEBD	85,20%	14,30%	0,00%	0,00%	0,20%	-	0,30%
PS	90,20%	8,60%	0,90%	0,00%	0,10%	-	0,19%
Otros plásticos	60,00%	7,20%	22,80%	0,00%	0,00%	-	10,00%
Caucho y neumáticos	76,50%	7,40%	3,70%	0,80%	1,40%	-	10,19%
Cuero	60,00%	8,00%	11,60%	10,00%	0,40%	-	10,00%
Textiles	55,00%	6,60%	31,20%	4,60%	0,20%	-	2,45%
Madera	49,50%	6,00%	42,40%	0,40%	0,10%	-	1,64%
Metales	4,50%	0,60%	4,30%	0,10%	0,00%	-	90,50%
Vidrio	0,50%	0,10%	0,40%	0,10%	0,00%	-	98,90%
Sanitarios	43,60%	6,00%	49,90%	0,10%	0,20%	-	0,28%
Barreduras	26,30%	3,00%	2,00%	0,50%	0,20%	-	68,00%
Huesos	37,00%	4,60%	16,20%	5,50%	0,50%	-	36,30%
Otros residuos	25,90%	4,80%	15,80%	0,40%	0,20%	-	52,92%

ANEXO C. Valores de análisis próximo para cada tipo de residuo.

Tipos de Residuos en el Carrasco	Componentes del análisis próximo		
	Carbón Fijo	Volátiles	Cenizas
Orgánicos	16,30%	77,70%	6,00%
Papel	9,69%	78,89%	11,42%
Poda y jardinería	19,60%	75,90%	4,50%
Cartón	11,90%	79,82%	8,28%
PET	7,53%	92,27%	0,20%
PEAD	0,32%	99,10%	0,58%
PVC	10,67%	83,47%	5,86%
PEBD	0,27%	99,43%	0,30%
PS	0,33%	99,48%	0,19%
Otros plásticos	2,60%	87,40%	10,00%
Caucho y neumáticos	22,43%	67,38%	10,19%
Cuero	76,11%	13,89%	10,00%
Textiles	75,70%	21,85%	2,45%
Madera	15,26%	83,10%	1,64%
Metales	4,20%	5,30%	90,50%
Vidrio	0,50%	0,60%	98,90%
Sanitarios	6,81%	92,91%	0,28%
Barreduras	23,60%	8,40%	68,00%
Huesos	4,46%	59,24%	36,30%
Otros residuos	23,50%	23,58%	52,92%